



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Τεχνο-οικονομική αξιολόγηση προηγμένων καυσίμων και συστημάτων πρόωσης

Techno-economic evaluation of advanced fuels and propulsion systems

Συγγραφέας:

ΝΤΟΜΑΤΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

A.M.: 51117086

Επιβλέπουσα: Δρ. Στράντζαλη Ελένη

Αιγάλεω, 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Πτυχιακή εργασία

Τεχνο-οικονομική αξιολόγηση προηγμένων καυσίμων και συστημάτων πρόωσης

Συγγραφέας

ΝΤΟΜΑΤΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ (Α.Μ.: 51117086)

Επιβλέπουσα

Δρ. Στράντζαλη Ελένη,

Ακ. Υπότροφος ΠΑ.Δ.Α.

Ημερομηνία εξέτασης

23/11/2022

Εξεταστική Επιτροπή

Ελένη Στράντζαλη,
Ακ. Υπότροφος ΠΑ.Δ.Α.

Σωτηρία Δημητρέλλου,
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
ΠΑ.Δ.Α.

Δημήτριος-Νικόλαος
Παγώνης,
Αναπληρωτής Καθηγητής
ΠΑ.Δ.Α.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ντομάτας Ιωάννης του Νικολάου, με αριθμό μητρώου 5117086, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Ντομάτας Ιωάννης

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ. Στράντζαλη Ελένη, για την τιμή που μου έκανε να μελετήσω ένα θέμα που επηρεάζει άμεσα την πραγματικότητα της ναυτιλίας, στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, που σε όλα τα χρόνια της εκπαιδευτικής μου πορείας στάθηκαν και στέκονται δίπλα μου με κάθε δυνατό τρόπο.

Περίληψη

Παγκοσμίως, ο τομέας της ναυτιλίας καλύπτει ένα τεράστιο ποσοστό στον τομέα των μεταφορών. Η ζήτηση των αγαθών ολοένα και αυξάνεται, ένα γεγονός που οδηγεί στην περαιτέρω αύξηση του ποσοστού κάλυψης των μεταφορών από τον τομέα της ναυτιλίας. Οι μεταφορές, στον τομέα αυτόν είναι οικονομικές και αποτελεσματικές, συγκριτικά με όλους τους υπόλοιπους τύπους μεταφορών. Ωστόσο, κατά τα τελευταία 30 έτη τουλάχιστον η κλιματική αλλαγή και οι επιπτώσεις της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος έχουν αποτελέσει ένα θέμα μείζονος σημασίας, με τον τομέα της ναυτιλίας να κατέχει σημαντικό ρόλο στην αύξηση αυτή. Ως επί το πλείστο τα πλοία, χρησιμοποιούν για την κίνηση τους μηχανές εσωτερικής καύσης και ως βασικό τύπο καυσίμου χρησιμοποιούν το ναυτιλιακό πετρέλαιο. Έτσι, κατά την καύση του πετρελαίου ελευθερώνονται διάφορα αέρια που επιβαρύνουν σε μεγάλο βαθμό το περιβάλλον. Παρ' όλα αυτά, στο πρόβλημα αυτό σημαντική λύση μπορεί να δώσει η ανάπτυξη της τεχνολογίας η οποία έχει συμβάλλει ουσιαστικά σήμερα στην δημιουργία συστημάτων φιλικών προς το περιβάλλον και την επεξεργασία των καυσίμων αλλά και την εύρεση νέων τύπων προηγμένων καυσίμων.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης γίνεται μια τεchnο - οικονομική αξιολόγηση των προηγμένων αυτών καυσίμων αλλά και των συστημάτων πρόωσης που εφαρμόζονται στα πλοία. Ειδικότερα, στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μια αναφορά στα συμβατικά καύσιμα και τα συστήματα πρόωσης. Στη συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι τύποι των προηγμένων καυσίμων και στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια ανάλυση των προηγμένων συστημάτων πρόωσης. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας, γίνεται μία τεchnο – οικονομική ανάλυση για την εφαρμογή εναλλακτικών καυσίμων σε συστήματα πρόωσης διαφόρων τύπων πλοίων. Η ανάλυση αυτή θα βασιστεί σε οικονομικές μελέτες περιπτώσεων πλοίων, με σκοπό την ανάδειξη της αποδοτικότερης επένδυσης.

Λέξεις κλειδιά: Ναυτιλία, Περιβάλλον, Συστήματα πρόωσης, Εναλλακτικά καύσιμα

Abstract

Globally, the shipping sector accounts for a huge share of the transport sector. The demand for goods is increasing, a fact that leads to a further increase in the share of transport coverage by the shipping sector. Transport in this sector is economical and efficient compared to all other types of transport. However, over the last 30 years at least, climate change and the effects of environmental pollution have become a major issue, with the shipping sector playing a significant role in this increase. For the most part, ships are powered by internal combustion engines and use marine oil as their main fuel type. Thus, the combustion of oil releases various gases that are highly polluting to the environment. However, this problem can be solved significantly by the development of technology, which has made a substantial contribution to the creation of environmentally friendly systems and fuel treatment and the development of new types of advanced fuels.

This study provides a techno-economic assessment of these advanced fuels and the propulsion systems used on board ships. In particular, the first chapter of the thesis makes a reference to conventional fuels and propulsion systems. The second chapter then analyses the types of advanced fuels and the third chapter provides an analysis of advanced propulsion systems. Finally, in the fourth chapter, a techno-economic analysis of the application of alternative fuels in propulsion systems for different types of ships is presented. This analysis will be based on economic case studies of ships in order to identify the most cost-effective investment.

Keywords: Shipping, Environment, Propulsion systems, Alternative fuels

Περιεχόμενα

| | |
|---|-----------|
| Κεφάλαιο 1: Συμβατικά καύσιμα και συστήματα πρόωσης..... | 5 |
| 1.2 Καύσιμα και συστήματα πρόωσης τον 21^ο αιώνα | 7 |
| 1.2.1 Κινητήρας Diesel..... | 8 |
| 1.2.2 Συμβατικά καύσιμα ναυτιλίας..... | 8 |
| 1.3 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα της ναυσιπλοΐας..... | 13 |
| 1.3.1 Περιβαλλοντική νομοθεσία | 18 |
| Κεφάλαιο 2: Ανάλυση προηγμένων καυσίμων | 20 |
| 2.1 Υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG)..... | 20 |
| 2.2 Μεθανόλη | 22 |
| 2.2.1 Παραγωγή – καύση μεθανόλης..... | 22 |
| 2.2.2 Σύστημα καυσίμου μεθανόλης..... | 25 |
| 2.3 Υδρογόνο | 26 |
| 2.3.1 Παραγωγή υδρογόνου | 27 |
| 2.3.2 Το υδρογόνο ως καύσιμο στη ναυτιλία | 30 |
| 2.4 Αμμωνία | 33 |
| 2.4.1 Η αμμωνία ως φορέας υδρογόνου..... | 35 |
| 2.4.2 Παραγωγή και αποθήκευση αμμωνίας | 36 |
| 2.4.3 Ασφάλεια..... | 37 |
| 2.4.4 Η αμμωνία ως καύσιμο στη ναυτιλία..... | 39 |
| 2.5 Βιοκαύσιμα | 41 |
| 2.5.1 Τρέχοντα βιοκαύσιμα τύπου Diesel από βιομάζα | 42 |
| 2.5.2 Συμβατά βιοκαύσιμα | 44 |
| 2.5.3 Προηγμένες τεχνολογίες παραγωγής βιοκαυσίμων..... | 47 |
| Κεφάλαιο 3: Ανάλυση προηγμένων συστημάτων πρόωσης..... | 50 |
| 3.1 Υβριδικά συστήματα και συστήματα διπλού καυσίμου | 50 |

| | | |
|---|---|------------|
| 3.1.1 | Συστήματα πρόωσης διπλού καυσίμου (Dual-fuel propulsion)..... | 50 |
| 3.1.2 | Υβριδικά συστήματα πρόωσης (Hybrid propulsion) | 55 |
| 3.2 | Αεριοστρόβιλοι (Gas turbines)..... | 61 |
| 3.2.1 | Συστήματα στροβίλων για πρόωση πλοίων..... | 63 |
| 3.2.2 | Περιβαλλοντικά ζητήματα | 66 |
| 3.3 | Κυψέλες καυσίμων (Fuel cells) | 68 |
| 3.3.1 | Τύποι κυψελών καυσίμου..... | 68 |
| Κεφάλαιο 4: Τεχνο-οικονομική ανάλυση | | 74 |
| 4.1 | Μεθοδολογία..... | 74 |
| 4.2 | Παραδοχές της ανάλυσης..... | 75 |
| 4.3 | Τιμές καυσίμων και παράγοντες..... | 76 |
| 4.3.1 | Ενεργειακή πυκνότητα και αποθήκευση | 80 |
| 4.4 | Συγκριτική αξιολόγηση ανανεώσιμων ναυτιλιακών καυσίμων..... | 83 |
| 4.4.1 | Εργαλεία αξιολόγησης επενδύσεων | 83 |
| 4.4.2 | Αποτελέσματα σύγκρισης μέσω του κριτηρίου ΚΠΑ | 93 |
| 4.5 | Επένδυση στη ναυτιλιακή αγορά | 95 |
| 4.5.1 | Ανάλυση Ευαισθησίας | 95 |
| 4.5.2 | Κόστος Καυσίμου..... | 95 |
| Κεφάλαιο 5: Ανακεφαλαίωση | | 98 |
| Συμπεράσματα..... | | 99 |
| Βιβλιογραφία | | 101 |

Πρόλογος

Η κλιματική κρίση θεωρείται η μεγαλύτερη απειλή για την ανθρώπινη επιβίωση και την πολιτική σταθερότητα. Ο κύριος παράγοντας που προκαλεί την υπερθέρμανση του πλανήτη είναι η αύξηση των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η τέταρτη έκθεση αξιολόγησης του 2007 από τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή των Ηνωμένων Εθνών ανέφερε ότι το μεγαλύτερο μέρος της παρατηρούμενης υπερθέρμανσης τα τελευταία 50 χρόνια είναι σχεδόν βέβαιο ότι οφείλεται στις αυξανόμενες συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η αποψίλωση των δασών και η καύση των ορυκτών καυσίμων. Η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα έχει αυξηθεί από τα περίπου 280 ppm πριν τη βιομηχανική εποχή σε 391 ppm το 2011, ενώ το 2014 η συγκέντρωση ξεπέρασε τα 400 ppm. Η συνεχής και αυξανόμενη εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου αποτελεί επομένως ένα θέμα παγκόσμιας ανησυχίας (Yue et al., 2015).

Ωστόσο αρκετές χώρες έχουν θέσει φιλόδοξους και μακροπρόθεσμους στόχους μείωσης των εκπομπών άνθρακα, για παράδειγμα οι ΗΠΑ έχουν δεσμευτεί να μειώσουν τις εκπομπές άνθρακα κατά 17% και 83% σε σχέση με τα επίπεδα του 2005 έως το 2020 και το 2050, αντίστοιχα, ενώ το Ηνωμένο Βασίλειο στοχεύει να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 80% έως το 2050, σε σχέση με το 1990. Η Κίνα, ο μεγαλύτερος ρυπαντής στον κόσμο, έχει πλέον δεσμευτεί να μειώσει τις εκπομπές της κατά 40-45% σε σχέση με τα επίπεδα του 2005, έως το 2020. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου προέρχεται σε μεγάλο βαθμό από τη βιομηχανία, τις μεταφορές και τον ενεργειακό τομέα, ενώ ο εμπορικός και γεωργικός τομέας και η αποψίλωση των δασών επίσης συμβάλλουν σημαντικά στην απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα, μεθανίου και άλλων αερίων του θερμοκηπίου.

Οι διεθνείς μεταφορές είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη του παγκόσμιου εμπορίου. Οι εκπομπές άνθρακα που οφείλονται στον τομέα των μεταφορών υπολογίζονται σε πάνω από δέκα τοις εκατό των συνολικών εκπομπών, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τον τρόπο μεταφοράς των αγαθών (López, Díaz, Zubelzu, & Álvarez, 2015). Το 2015 διερευνήθηκαν οι εκπομπές από τον τομέα της εφοδιαστικής αλυσίδας στο

Χονγκ Κονγκ. Αποδείχθηκε ότι το συνολικό φορτίο που διακινήθηκε μέσω θαλάσσιων μεταφορών ήταν περίπου 26,9 εκατομμύρια τόνοι και για τη μεταφορά του παρήχθησαν περίπου 12,7 εκατομμύρια τόνοι ισοδυνάμου CO₂. Επομένως γίνεται εμφανής η σημασία της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον τομέα των μεταφορών και ιδιαίτερα στις θαλάσσιες μεταφορές. Η μείωση αυτή μπορεί να επιτευχθεί μέσω της υιοθέτησης νέων τεχνολογιών πρόωσης και προηγμένων καυσίμων, με ελάχιστες ή μηδενικές εκπομπές άνθρακα και με ουδέτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Κεφάλαιο 1: Συμβατικά καύσιμα και συστήματα πρόωσης

Η σχέση του ανθρώπου με τη θάλασσα εκτείνεται πολλές χιλιάδες χρόνια πίσω. Πιστεύεται ότι οι άνθρωποι διέσχισαν τη θάλασσα από την ηπειρωτική Ελλάδα προς την Κρήτη πριν από σχεδόν 130.000 χρόνια και από τα νησιά της Νοτιοανατολικής Ασίας προς το πλησιέστερο σημείο της αυστραλιανής ηπείρου πριν από σχεδόν 50.000 χρόνια. Ωστόσο από αυτά τα ταξίδια, δεν υπάρχουν περισσότερα γνωστά πέραν των αρχαιολογικών στοιχεία. (Fagan B., 2012). Μέχρι την εποχή των εξερευνήσεων του Κολόμβου και του Vasco Da Gama, οι σημαντικότερες τεχνολογικές εξελίξεις της ναυσιπλοΐας οφείλονταν στη δημιουργία εμπορικών κέντρων και στη διατήρηση των εμπορικών μονοπωλίων. Από την εποχή των μεγάλων ανακαλύψεων, οι εκπρόσωποι των εθνών και όχι οι αποικιοκράτες έμποροι ήταν αυτοί που ταξίδευαν στη θάλασσα. Υπήρξε μικρή πρόοδος στο σχεδιασμό των πλοίων, τα οποία ωστόσο συνέχιζαν να έχουν μικρό μέγεθος, χαμηλή ταχύτητα, εξάρτηση από τον άνεμο και έλλειψη αξιοπλοΐας.

Οι εξερευνήσεις του Βάσκο ντα Γκάμα και του Κολόμβου άλλαξαν εντελώς τη στάση των εθνών όσον αφορά τα θαλάσσια ταξίδια. Ο Κολόμβος, στο περίφημο ταξίδι του το 1492, χρησιμοποίησε τρία σκάφη: Δύο караβέλες με ανοικτό προπύργιο και χωρίς κατάστρωμα στο μέσο και ένα τρίτο σκάφος, το Santa Maria (Lindsay, 1874).

Οι ναυπηγοί εκείνης της εποχής αντιμετώπισαν μια σειρά από προβλήματα, ώστε να καταφέρουν να κατασκευάσουν πλοία ικανά για κάλυψη μεγάλων αποστάσεων. Την περίοδο αυτή ξεκίνησε η εξωτερική μεταλλική επένδυση των πλοίων ώστε να εξουδετερωθεί η επίδραση των παράσιτων του ξύλου και η διάταξη των ιστίων μελετήθηκε πιο προσεκτικά. Ο Phineas Pett, ο πρώτος διευθυντής των ναυπηγείων Shipwrights στην Αγγλία, εισήγαγε πολλές καινοτομίες και νέες μεθόδους κατασκευής κατά τις αρχές του 17ου αιώνα. Σχεδίασε το πρώτο τρικάταρτο πολεμικό πλοίο, το Sovereign of the Seas, που ολοκληρώθηκε το 1637.

Στις αρχές του 18ου αιώνα, έγιναν βελτιώσεις στον εξοπλισμό και τα εξαρτήματα των πλοίων, αλλά η κύρια καινοτομία ήταν στο σύστημα κατασκευής του κύτους και στις μεθόδους επεξεργασίας της ξυλείας. Αν και στις πρώτες μέρες της ναυπηγικής χρησιμοποιούνταν φρέσκια ξυλεία - η οποία ήταν πιο εύκαμπτη - στη πορεία υιοθετήθηκαν

τεχνικές επεξεργασίας του ξύλου που επέκτειναν τη διάρκεια ζωής του και το καθιστούσαν ακόμα πιο εύκαμπτο.

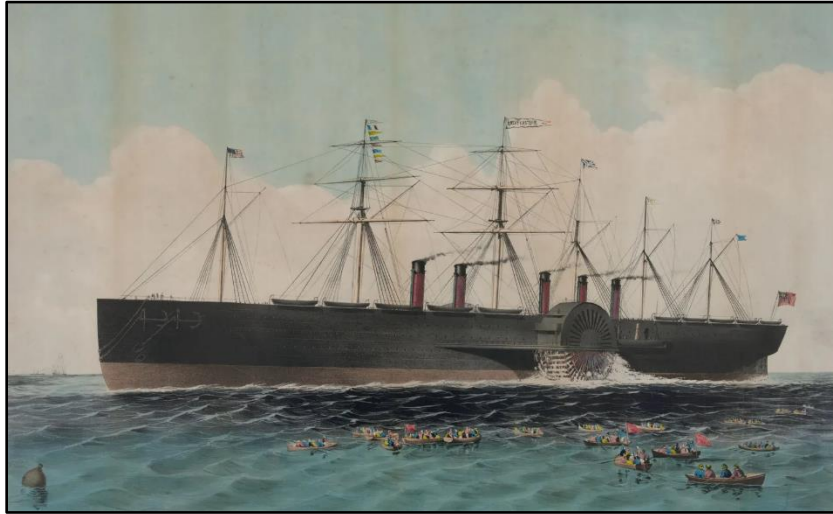
Το 1736, ο Jonathon Hulls από το Ηνωμένο Βασίλειο, έλαβε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για το ατμοκίνητο σκάφος του. Ο μαρκήσιος Κλοντ ντε Ζουφράι ντ' Αμπάνς δοκίμασε με επιτυχία το ατμόπλοιο *Pyroscaphe*, που κατασκευάστηκε το 1783 στον ποταμό Saône. Το σκάφος του Τζον Φιτς πραγματοποίησε δοκιμαστικό ταξίδι 20 μιλίων στις 12 Οκτωβρίου 1788, μεταφέροντας 30 επιβάτες από τη Φιλαδέλφεια στο Μπέρλινγκτον μέσω του ποταμού Ντέλαγουερ. Τα πειράματα του William Symington μετέφεραν τις ατμομηχανές από την πειραματική στην εμπορική χρήση. Ο Αμερικανός μηχανικός Robert Fulton έγινε μάρτυρας της δουλειάς του Symington και συζήτησε μαζί του για τις βελτιώσεις στον κινητήρα, οι οποίες στη συνέχεια τον βοήθησαν τα δικά του πειράματα. Τα πειράματα του Fulton ξεκίνησαν αρχικά στον ποταμό Σηκουάνα το 1803 και συνεχίστηκαν με το Clermont, το οποίο διέσχισε τον ποταμό Hudson μεταξύ Νέας Υόρκης και Albany (Rowland, 1970).

Ο Froude θεωρείται ως ο πατέρας της σύγχρονης ναυπηγικής. Το 1856, ο Μπρουνέλ του ζήτησε να διερευνήσει τους νόμους της κίνησης ενός πλοίου, με ιδιαίτερη αναφορά στη κατασκευή του Μέγα Ανατολικού. Τα πειράματα Froude αφορούσαν μεταξύ άλλων, τη μορφή των ελίκων και τη σχέση μεταξύ της αντίστασης των μοντέλων και των πλοίων πλήρους μεγέθους. Ενθαρρυσμένος από τον Sir Edward Reid, επικεφαλής κατασκευαστή του Βασιλικού Ναυτικού, τέθηκε στη διάθεσή του ένα ποσό £2,000 για την κατασκευή μιας δεξαμενής για να συνεχίσει την εργασία του και να επιβεβαιώσει τα αποτελέσματά του.

Το πλοίο *Sirius*, που κατασκευάστηκε το 1838, ήταν το πρώτο σκάφος που διέσχισε τον Ατλαντικό συνεχώς και εξ ολοκλήρου με ατμό, επιτυγχάνοντας τη διάσχιση σε 18 ημέρες και 10 ώρες, με μέση ταχύτητα 7,5 κόμβων. Μέχρι το 1835, μια εξέλιξη επρόκειτο να αλλάξει τα δεδομένα όταν ο Francis Pettit Smith σχεδίασε την πρώτη προπέλα. Η εφεύρεσή του εφαρμόστηκε αρχικά σε ένα μικρό ατμόπλοιο, που έκανε ταξίδια από το Λονδίνο στο Ντόβερ. Ο Brunel αναγνώρισε το πλεονέκτημα της προπέλας και το εφάρμοσε για τα νέα σκάφη που κατασκευάζονταν στη Μεγάλη Βρετανία.

Το ατμόπλοιο πέρασε από πολλές φάσεις - μια από τις πιο σημαντικές ήταν η κατασκευή του Μέγα Ανατολικού από τον John Scott Russell το 1858. Αυτό το σκάφος, με εκτόπισμα 27.000 τόνων, θεωρούνταν ένα από τα θαύματα του κόσμου.

Χρησιμοποιούσε δύο τροχούς με κουπιά και προπέλα και οι κινητήρες του, ισχύος 7,650HP του προσέδιδαν ταχύτητα 14.5 κόμβων.



Σχήμα 1.1 Η κατασκευή του ατμόπλοιου Μέγας Ανατολικός από τον John Scott Russell το 1858 ήταν ένα εξαιρετικό επίτευγμα μηχανικής ευρηματικότητας. (Parsons, 1858)

1.2 Καύσιμα και συστήματα πρόωσης τον 21^ο αιώνα

Η εισαγωγή του σιδήρου και στη συνέχεια του χάλυβα στη ναυπηγική βοήθησε στην ανάπτυξη της σύγχρονης εποχής της ναυτιλίας και άνοιξε το δρόμο για νέες ναυπηγικές μεθόδους. Οι μεταλλικές τρόπιδες προανήγγειλαν επίσης την έλευση της πρόωσης Diesel, καθώς επίσης και την αλλαγή στους τύπους των πλοίων. Τα πλοία δεν χρησιμοποιούνταν πλέον αποκλειστικά για μεταφορές εμπορευμάτων: Διαφορετικοί τύποι πλοίων αναπτύχθηκαν για συγκεκριμένες συναλλαγές - επιβατικά πλοία για να μεταφέρουν επιβάτες, δεξαμενόπλοια για να μεταφέρουν καύσιμα, πλοία μεταφοράς αερίου, κρουαζιερόπλοια, πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (κοντέινερ) και πολλοί άλλοι τύποι.

Λίγο πριν τα τέλη του 19ου αιώνα, ο Diesel θα αναπτύξει τον κινητήρα που φέρει το όνομά του και εξακολουθεί μέχρι σήμερα να αποτελεί τον κύριο τύπο κινητήρα για τη συντριπτική πλειοψηφία των πλοίων. Ένα από τα πρώτα πλοία που κινούνταν με κινητήρα Diesel ήταν το διάσημο MS Selandia.

1.2.1 Κινητήρας Diesel

Οι κινητήρες Diesel αποτελούν τη συνήθη επιλογή για χρήση σχεδόν σε όλους τους τύπους πλοίων. Τα πλεονεκτήματα που εμφανίζουν οι κινητήρες Diesel έναντι των εναλλακτικών πηγών ισχύος όπως οι κινητήρες βενζίνης ή υγραερίου είναι:

- αποδεδειγμένη απόδοση και αξιοπιστία υπό συνθήκες υψηλού φορτίου
- χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου σε σχέση με την απόδοση ισχύος
- μεγαλύτερη ροπή για μεγαλύτερες περιόδους
- Οι κινητήρες Diesel είναι πιο αποτελεσματικοί από τους βενζινοκινητήρες. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο συντελεστής απόδοσης ενός κινητήρα Diesel ξεπερνά το 50%, τη στιγμή που η απόδοση ενός κινητήρα βενζίνης δε ξεπερνά το 35%. Αυτό το γεγονός αυξάνει τόσο την ισχύ όσο και την οικονομία.
- Το πετρέλαιο Diesel είναι λιγότερο εύφλεκτο από τη βενζίνη
- Οι αναθυμιάσεις από τις εξατμίσεις των κινητήρων Diesel είναι λιγότερο τοξικές και ρυπογόνες από αυτές που εκπέμπονται από τους βενζινοκινητήρες.

Η βασική αρχή λειτουργίας των κινητήρων Diesel είναι η μετατροπή της παλινδρομικής κίνησης του εμβόλου σε περιστροφική κίνηση. Αυτό επιτυγχάνεται με τον κύκλο ανάφλεξης με συμπίεση των εμβόλων και με μετατροπή σε περιστροφική κίνηση μέσω του στροφαλοφόρου άξονα. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κινητήρων Diesel, ο δίχρονος και ο τετράχρονος κινητήρας.

1.2.2 Συμβατικά καύσιμα ναυτιλίας

Η ιστορία του κινητήρα Diesel ξεκίνησε το 1892 και περίπου είκοσι χρόνια αργότερα, λειτούργησαν τα πρώτα πλοία με τετράχρονο κινητήρα Diesel. Γύρω στο 1930, οι δίχρονοι κινητήρες πήραν ισχυρό προβάδισμα, καθώς τα πλοία έγιναν μεγαλύτερα και πιο γρήγορα.

Ακολούθησε μια σειρά από καινοτομίες, οι οποίες κατέστησαν δυνατή τη χρήση βαρέως μαζούτ σε μέσης ταχύτητας εμβολοφόρους κινητήρες Diesel.

- Αργό Πετρέλαιο

Το αργό πετρέλαιο είναι ένα μείγμα πολλών υδρογονανθράκων και μικρών ποσοτήτων ακαθαρσιών. Η σύνθεση του αργού πετρελαίου μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με την πηγή του. Αργό πετρέλαιο από την ίδια γεωγραφική περιοχή μπορεί να είναι αρκετά διαφορετικό λόγω των διαφορετικών στρωμάτων σχηματισμού του. Η ταξινόμηση του αργού πετρελαίου βασίζεται στο:

1. *Τύπο υδρογονανθράκων:*

- Παραφινικά
- Ναφθενικά
- Ασφαλτούχα

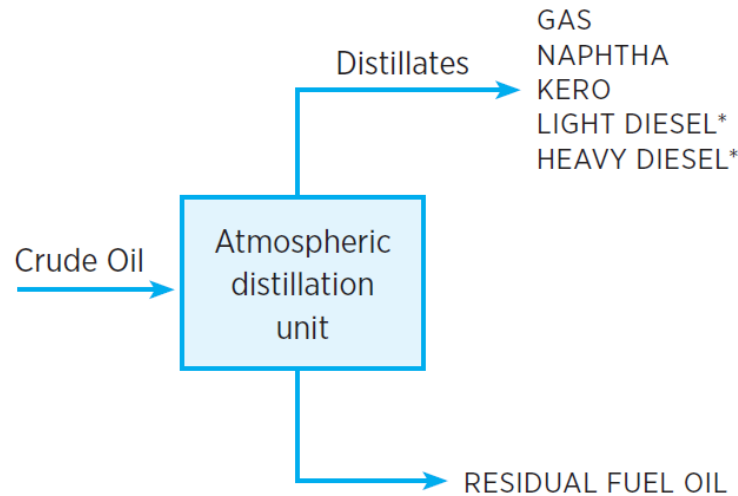
2. *Ειδικό βάρος κατά το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου (API):* Όσο μικρότερη είναι η πυκνότητα του αργού πετρελαίου, τόσο μεγαλύτερο είναι το ειδικό βάρος του κατά API. Υψηλότερες τιμές για το ειδικό βάρος σημαίνει ότι το αργό πετρέλαιο περιέχει περισσότερα πολύτιμα κλάσματα χαμηλού βρασμού.

3. *Περιεκτικότητα σε θείο:* Οι διαρκώς αυξανόμενες περιβαλλοντικές ανησυχίες και ο αντίκτυπος στο κόστος διύλισης αποτελούν τη βάση για αυτή την ταξινόμηση.

- Αργό με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο
- Αργό με υψηλή περιεκτικότητα σε θείο

- Τυπικά συστήματα διύλισης και η επίδραση στα ναυτιλιακά καύσιμα

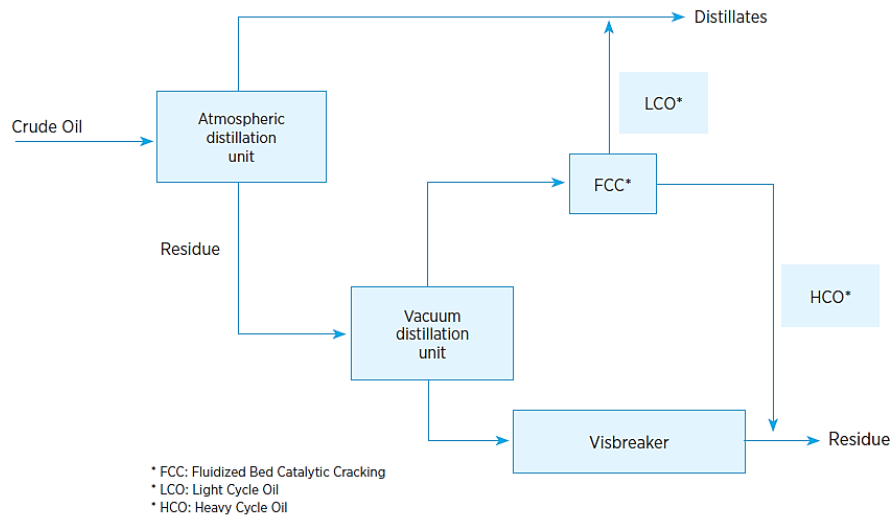
Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζεται η διεργασία της ατμοσφαιρικής απόσταξης καθώς και η περαιτέρω διύλιση των αποσταγμάτων:



Σχήμα 1.2 Ατμοσφαιρική απόσταξη και διύλιση κλασμάτων (TECNOVERITAS, 2018)

- Αποστάγματα για ανάμειξη ναυτιλιακών καυσίμων
Ελαφρύ Diesel, βαρύ Diesel και υπολειμματικά καύσιμα
- Αποστάγματα ναυτιλιακού gasoil και ναυτιλιακού πετρελαίου Diesel (MDO)
Το ναυτιλιακό gasoil και το ναυτιλιακό πετρέλαιο Diesel παράγεται από ελαφριά και βαριά κλάσματα πετρελαίου.
- Απόσταγμα IFO 380 mm²/s (στους 50°C)
Αυτό το ενδιάμεσο κλάσμα πετρελαίου (IFO) λαμβάνεται από ανάμειξη του υπολειμματικού κλάσματος υπό ατμοσφαιρική απόσταξη (συνήθης ιξώδες περίπου 800 mm²/s στους 50°C) με κλάσμα gasoil.

Τα σύνθετα διυλιστήρια προτιμώνται πολύ περισσότερο από τις αρχές της δεκαετίας του 1980 και έχουν σχεδιαστεί για να ενισχύσουν την παραγωγή βενζίνης. Τα κύρια συστατικά ανάμειξης των ναυτιλιακών καυσίμων που προέρχονται από ένα διυλιστήριο καταλυτικής πυρόλυσης ρευστοποιημένης κλίνης (FCC) είναι τα ίδια αποστάγματα με αυτά που προέρχονται από ένα διυλιστήριο ατμοσφαιρικής απόσταξης. Στο παρακάτω σχήμα εμφανίζεται η βασική διεργασία ενός διυλιστηρίου καταλυτικής πυρόλυσης.



Σχήμα 1.3 Διυλιστήριο καταλυτικής πυρόλυσης ρευστοποιημένης κλίνης
 (TECNOVERITAS, 2018)

Τα ναυτιλιακά καύσιμα που παράγονται από ένα διυλιστήριο καταλυτικής πυρόλυσης έχουν σύνθεση που διαφέρει σημαντικά από εκείνη ενός διυλιστηρίου ατμοσφαιρικής απόσταξης.

- Ναυτιλιακό πετρέλαιο (MGO/DMA/DMZ/DFA/DFZ)

Ένα νέο μείγμα gasoil, που περιέχει περίπου 60% αρωματικές ουσίες. Λόγω της υψηλής αρωματικής φύσης του, η πυκνότητα ενός ναυτιλιακού πετρελαίου που αναμειγνύεται με το συγκεκριμένο gasoil θα είναι υψηλότερη σε σχέση με κάποιο μείγμα που προέρχεται από ένα διυλιστήριο ατμοσφαιρικής απόσταξης - η πυκνότητα του είναι συνήθως κοντά στα 860 kg/m³ (στους 15°C). Δεν αναμένονται διαφορές στην απόδοση ή στο χειρισμό σε σχέση με το πετρέλαιο που προέρχεται από ατμοσφαιρική απόσταξη. Το 2010, η τέταρτη έκδοση του προτύπου ISO 8217 εισήγαγε μια πρόσθετη κατηγορία ναυτιλιακού gasoil, το DMZ, το οποίο έχει υψηλότερο ελάχιστο ιξώδες από το DMA, αλλά γενικά είναι πανομοιότυπο ως προς αυτό.

- Απεσταγμένο ναυτιλιακό πετρέλαιο Diesel (MDO/DMB/DFB)

Το απεσταγμένο ναυτιλιακό πετρέλαιο Diesel (εμπορική ονομασία) έχει συνήθως χαμηλότερο δείκτη κετανίου από το ναυτιλιακό gasoil και υψηλότερη πυκνότητα. Λόγω της παραγωγικής διεργασίας ενός διυλιστηρίου καταλυτικής πυρόλυσης, το απεσταγμένο ναυτιλιακό Diesel μπορεί επομένως να περιέχει υψηλότερο ποσοστό gasoil από το ναυτιλιακό πετρέλαιο.

- Καύσιμα συμβατά με τον IMO 2020

Η εισαγωγή του μέγιστου ορίου S στο 0,50% από την 1η Ιανουαρίου 2020 για τα ναυτιλιακά καύσιμα, είχε ως αποτέλεσμα την είσοδο στην αγορά μεγάλης ποικιλίας νέων μειγμάτων. Το κλάσμα ατμοσφαιρικής απόσταξης κενού, το απόσταγμα κενού, το απόσταγμα υδρογονοπυρόλυσης, το απόσταγμα καταλυτικής πυρόλυσης και το υπόλειμμα είναι μόνο μερικά από τα προϊόντα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάμειξη καυσίμων με μέγιστο όριο θείου 0,50% (Chevron Corporation, 2021).

Ορισμένες από τις απαιτήσεις που τίθενται από τα διεθνή πρότυπα για τις προδιαγραφές των ναυτιλιακών καυσίμων εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα.

| Χαρακτηριστικά | ΜΜ | Όριο | Κατηγορία κατά ISO | | | | Πρότυπο μέτρησης |
|---------------------|--------------------|------|--------------------|-------|-------|--------|------------------|
| | | | DMX | DMA | DMZ | DMB | |
| Κιν. ιξώδες (40 °C) | mm ² /s | max. | 5,500 | 6,000 | 6,000 | 11,000 | ISO 3104 |
| | | min. | 1,400 | 2,000 | 3,000 | 2,000 | |
| Πυκνότητα (15 °C) | kg/m ³ | max. | - | 890 | 890 | 900 | ISO 3765 |
| Δείκτης κετανίου | - | min. | 45 | 40 | 40 | 35 | ISO 4264 |
| Θείο | mass% | max | 1 | 1 | 1 | 1.5 | ISO 8754 |
| Σημείο ανάφλεξης | °C | min. | 43 | 60 | 60 | 60 | ISO 2719 |
| Υδροθείο | mg/kg | max. | 2 | 2 | 2 | 2 | IP 570 |
| Αριθμός οξύτητας | mg KOH/g | max. | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | ASTM D664 |

Πίνακας 1.1 Προδιαγραφές ναυτιλιακών καυσίμων (ISO, 2017)

1.3 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα της ναυσιπλοΐας

Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) από τις θαλάσσιες μεταφορές υπολογίζονται σε περίπου ένα δισεκατομμύριο τόνους ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ eq.). Αυτό το ποσό αντιπροσωπεύει περίπου το 3% των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ένα αρκετά υψηλό ποσοστό σύμφωνα με τις τελευταίες μελέτες του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO). Αυτές οι εκπομπές θα πρέπει να μειωθούν τουλάχιστον κατά 50% έως το 2050, προκειμένου να επιτευχθούν οι δεσμεύσεις της συμφωνίας του Παρισιού. Η κύρια πηγή εκπομπών από τα πλοία είναι τα καυσαέρια από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης και ακολουθούν οι εκπομπές από την παραγωγή των ναυτιλιακών καυσίμων. Από αυτά τα καυσαέρια, το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) επηρεάζει το κλίμα, ενώ το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του θείου (SO_x), τα οξείδια του αζώτου (NO_x), το μεθάνιο (CH₄) και τα σωματίδια, συμπεριλαμβανομένης της αιθάλης, έχουν επιπτώσεις τόσο στο παγκόσμιο κλίμα όσο και στην ανθρώπινη υγεία.

Μέχρι το 2050, εάν δεν εφαρμοστεί αυστηρός έλεγχος εκπομπών και δε θεσπιστούν πολιτικές μετριασμού, τα μεσοπρόθεσμα σενάρια εκπομπών του IMO προβλέπουν ότι το 2050, οι εκπομπές των εμπορικών πλοίων θα αυξηθούν από 150 σε 250% ως αποτέλεσμα της ανάπτυξης του παγκόσμιου εμπορίου. Τα μελλοντικά σενάρια εκπομπών της IPCC υποδηλώνουν ότι οι εκπομπές CO₂ από τα πλοία θα είναι παραπάνω από το διπλάσιο της σημερινής τιμής το 2050 - εφόσον δε ληφθούν άμεσα μέτρα.

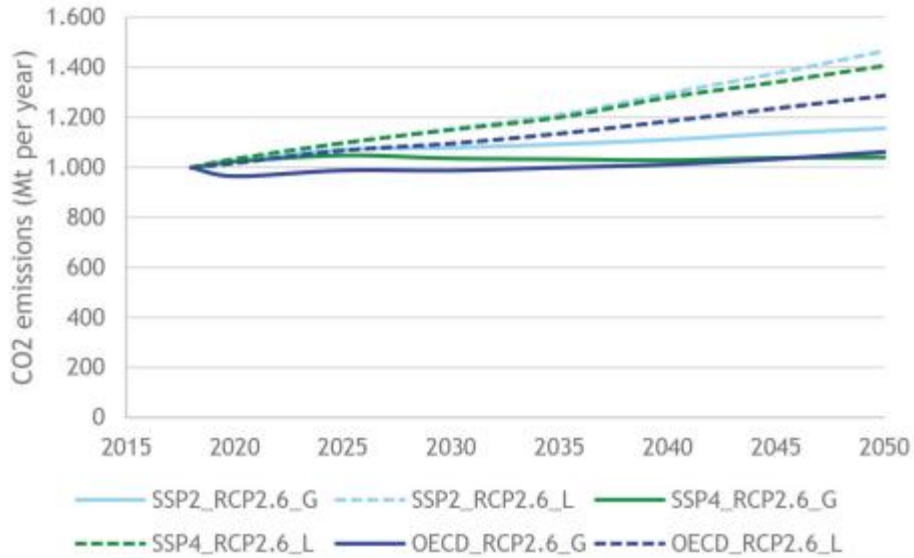
Τον Απρίλιο του 2018, ο IMO υιοθέτησε μία αρχική στρατηγική για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία, ένα πλαίσιο πολιτικής που θέτει βασικές φιλοδοξίες, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται οι ετήσιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τη διεθνή ναυτιλία τουλάχιστον κατά το ήμισυ έως το 2050, σε σύγκριση με το επίπεδό τους το 2008, και η προσπάθεια για την πλήρη εξάλειψη των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία το συντομότερο δυνατόν σε αυτόν τον αιώνα και η μείωση της έντασης άνθρακα της διεθνούς ναυτιλίας (για τη μείωση των εκπομπών CO₂ ανά μεταφορικό έργο), ως μέσος όρος στη διεθνή ναυτιλία, κατά τουλάχιστον 40% έως το 2030, με συνέχιση των προσπαθειών για 70% έως το 2050, σε σύγκριση με το 2008. (IMO, 2021)

Η αρχική στρατηγική περιλαμβάνει τη δέσμευση να αξιολογούνται οι επιπτώσεις στα κράτη (ιδίως στις λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες (LAX) και στα μικρά νησιωτικά αναπτυσσόμενα κράτη (MAAX) από κάθε μέτρο που προτείνεται προς υιοθέτηση. Η αρχική στρατηγική για τα αέρια του θερμοκηπίου θα αναθεωρηθεί έως το 2023.

Τον Ιούνιο του 2021, ο IMO ενέκρινε βασικά βραχυπρόθεσμα μέτρα με στόχο τη μείωση της έντασης άνθρακα όλων των πλοίων κατά τουλάχιστον 40% έως το 2030, σύμφωνα με τις φιλοδοξίες που ορίζονται στην αρχική στρατηγική του IMO. Τα μέτρα αυτά συνδυάζουν τεχνικές και επιχειρησιακές προσεγγίσεις για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων. Όλα τα πλοία θα πρέπει να υπολογίζουν τον δείκτη ενεργειακής απόδοσης υφιστάμενων πλοίων (EEXI) και τα πλοία άνω των 5.000 κόνων θα καθορίσουν τον ετήσιο λειτουργικό δείκτη έντασης άνθρακα (CII) και τη βαθμολογία CII. Πιο συγκεκριμένα, τα πλοία θα λάβουν μια βαθμολογία της ενεργειακής τους απόδοσης - A, B, Γ, Δ, E - όπου το A είναι το καλύτερο. (IMO, 2021)

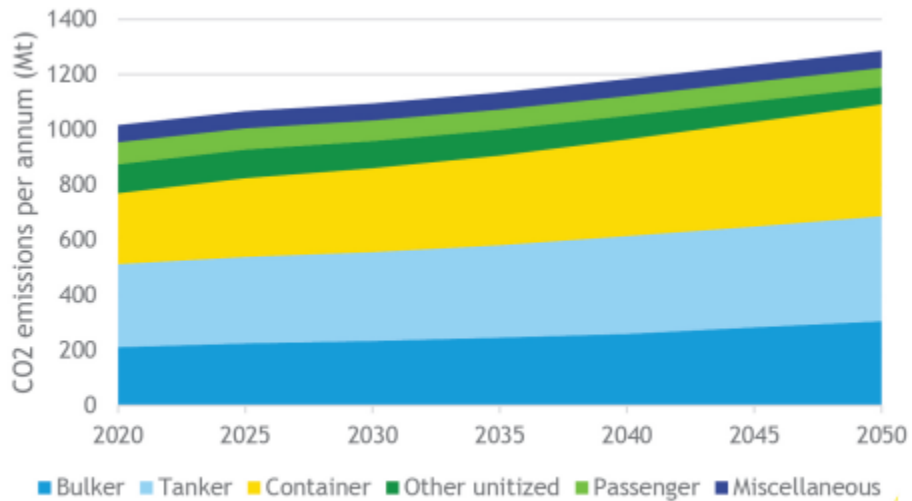
Αυτή είναι η πρώτη φορά που ο IMO καθιερώνει ένα επίσημο σύστημα αξιολόγησης για τα πλοία. Αυτό στέλνει ένα ισχυρό μήνυμα στην αγορά: Οι διοικήσεις, οι λιμενικές αρχές και άλλοι ενδιαφερόμενοι φορείς, ανάλογα με την περίπτωση, ενθαρρύνονται να παρέχουν κίνητρα στα πλοία που βαθμολογούνται με A ή B. Ένα πλοίο που βαθμολογείται με D για τρία συνεχόμενα έτη ή με E, υποχρεούται να υποβάλει σχέδιο διορθωτικής δράσης, για να δείξει πώς θα επιτευχθεί ο απαιτούμενος δείκτης (C ή υψηλότερος). (IMO, 2021)

Στην τέταρτη μελέτη που δημοσίευσε το 2020 ο IMO για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) παρουσίασε τις εκπομπές CO₂ της ναυτιλίας έως το 2050 σε ένα σενάριο όπου δεν θεσπίζεται καμία νέα ρύθμιση για τη ναυτιλία που να έχει αντίκτυπο στις εκπομπές ή την ενεργειακή απόδοση. Οι εκπομπές φαίνονται στο παρακάτω γράφημα, το οποίο δείχνει πως θα εξελιχθούν οι εκπομπές της ναυτιλίας όταν άλλοι τομείς ακολουθήσουν μια συγκεκριμένη οικονομική και κλιματική πορεία και η ναυτιλία όχι. Κατά την ερμηνεία αυτή, αποδεικνύεται η προσπάθεια που απαιτείται για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου στόχου εκπομπών για τον τομέα της ναυτιλίας. (IMO, 2020)



Σχήμα 1.4 Πρόβλεψη εκπομπών CO₂ ετησίως του ναυτιλιακού τομέα (IMO, 2020)

Στην ίδια μελέτη του IMO παρουσιάζεται ένα σενάριο οικονομικής ανάπτυξης, προβλέποντας την διαμόρφωση των εκπομπών για διάφορους τύπους πλοίων έως το 2050, καθιστώντας φανερή τη σχέση εξάρτησης αυτών με την οικονομική ανάπτυξη και τις θαλάσσιες μεταφορές, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.5.



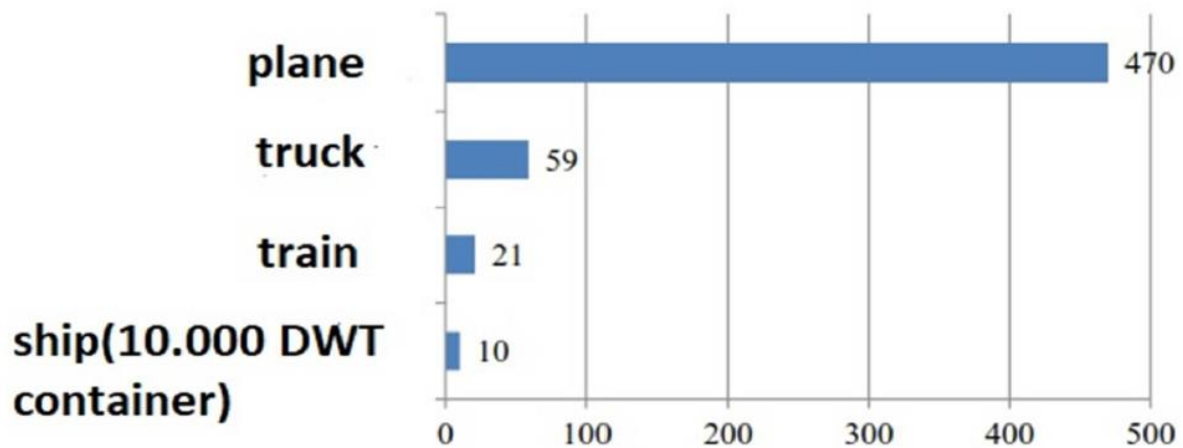
Σχήμα 1.5 Πρόβλεψη εκπομπών CO₂ ετησίως ανά τύπο πλοίου. (IMO, 2020)

Οι εκπομπές των χύδην φορητών πλοίων αυξάνονται κατά 10-50%, καθώς η μείωση της μεταφοράς άνθρακα αντισταθμίζεται από την αύξηση του μεταφορικού έργου άλλων ξηρών χύδην φορτίων. Οι εκπομπές των δεξαμενόπλοιων αυξάνονται κατά 30%, επειδή

αυξάνεται η μεταφορά χημικών και φυσικού αερίου, ακόμη και όταν μειώνεται το έργο μεταφοράς αργού πετρελαίου. Εκπομπές από τα εμπορευματοκιβώτια προβλέπεται να αυξηθούν σχεδόν κατά 20-70%, λόγω της αύξησης του μεταφορικού έργου κατά 70-140%. και την αύξηση της αποδοτικότητας λόγω της αύξησης των μεγεθών των πλοίων. (IMO, 2020)

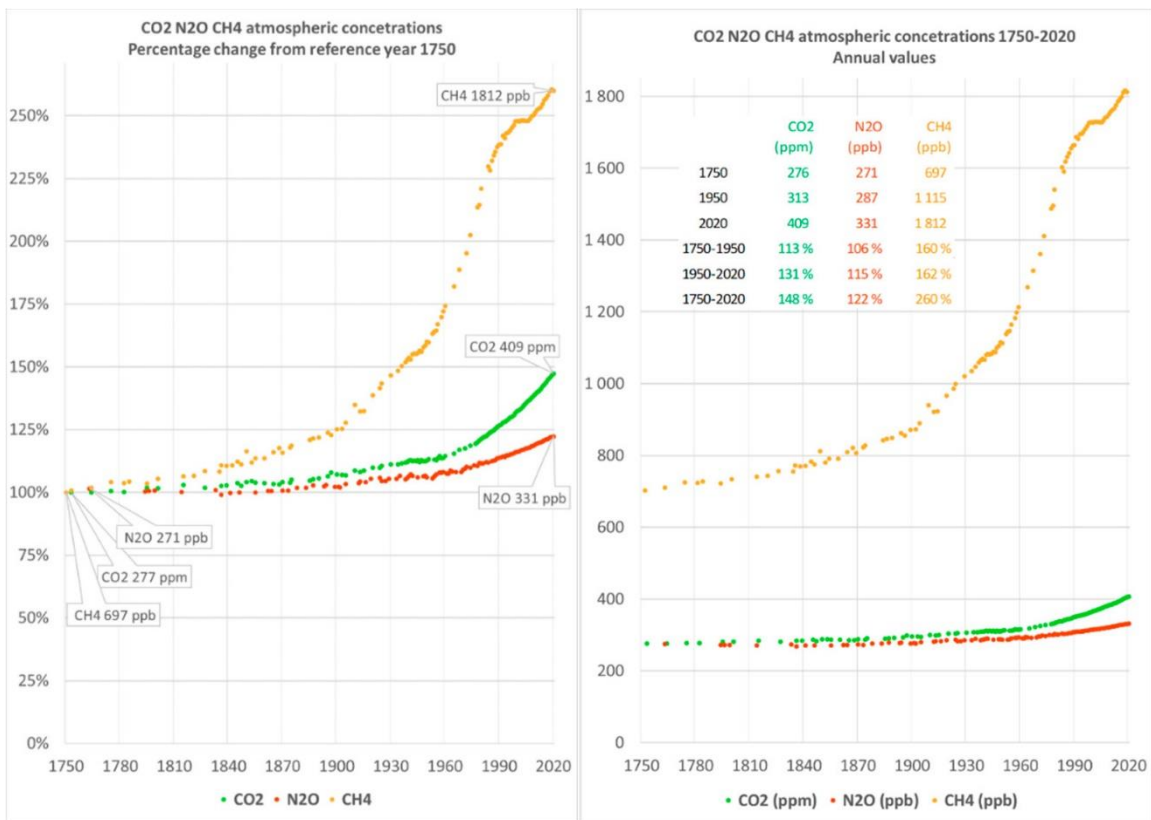
Υπολογίζεται ότι το παγκόσμιο εμπόριο αντιπροσωπεύει το 6% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα υπερβαίνοντας τους 1,4 εκατομμύρια τόνους το 2020 και οι εκπομπές CO₂ από τη ναυτιλία αυξάνονται αναλογικά με την αύξηση της μεταφορικής ικανότητας κατά περίπου 90%. Ως αποτέλεσμα μελετών που διεξήχθησαν σχετικά με την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές του στόλου παγκόσμιου θαλάσσιου εμπορίου, οι συνολικές ανθρωπογενείς εκπομπές υπολογίστηκε ότι είναι 2,7% CO₂, 11% NO_x και 2% SO_x.

Σύμφωνα με τα στοιχεία της IPCC, οι διεθνείς θαλάσσιες μεταφορές ευθύνονται για το 2,7% των συνολικών παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο αποδεικνύεται ότι η μεταφορά τοπικών προϊόντων σε κοντινές αποστάσεις παράγει περισσότερες εκπομπές CO₂, σε σχέση με τις θαλάσσιες μεταφορές μεγάλων αποστάσεων που παράγουν λιγότερο CO₂. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αναλογία φορτίου ανά τόνο / km είναι πολύ υψηλότερη σε σχέση με τις αεροπορικές ή οδικές μεταφορές και σε αυτό το πλαίσιο, η ποσότητα CO₂ ανά τόνο / km είναι η χαμηλότερη στις θαλάσσιες μεταφορές και φαίνεται στο Σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6 Σύγκριση της ποσότητας CO₂ που εκπέμπεται ανά χιλιόμετρο φορτίου με διαφορετικούς τρόπους μεταφοράς. (Publiship)

Το άκαυστο μεθάνιο από τους κινητήρες των πλοίων είναι μία από τις πολλές πηγές των αυξανόμενων εκπομπών μεθανίου παγκοσμίως. Τα αυξανόμενα επίπεδα μεθανίου στην ατμόσφαιρα αποτελούν σημαντική πρόκληση στην προσπάθεια περιορισμού της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Τα επίπεδα συγκέντρωσης του μεθανίου στην ατμόσφαιρα έχουν αυξηθεί δραστικά από τη βιομηχανική επανάσταση και σχεδόν τριπλασιάστηκαν. Συγκριτικά, η συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα, στην οποία τείνει να εστιάζει περισσότερο η συζήτηση για την κλιματική αλλαγή, έχει αυξηθεί πολύ λιγότερο, δηλαδή κατά 50% την ίδια περίοδο. Αυτή η εξέλιξη απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 1.7, όπου εμφανίζονται οι συγκεντρώσεις των ατμοσφαιρικών αερίων CO₂, N₂O και CH₄ από το 1750 έως το 2020, σε απόλυτες τιμές στην αριστερή πλευρά του σχήματος καθώς και ποσοστιαία στη δεξιά πλευρά.



Σχήμα 1.7 Ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις των αερίων CO₂, N₂O και CH₄ από το 1750 έως το 2020 (European Environment Agency, 2019)

Αν και η κύρια πηγή ανθρωπογενών εκπομπών μεθανίου είναι ο γεωργικός τομέας ο οποίος ευθύνεται για περισσότερες από τις μισές παγκόσμιες εκπομπές CH₄ - ο τομέας των θαλάσσιων μεταφορών παρουσιάζει ταχεία ανάπτυξη των εκπομπών μεθανίου, χωρίς σημάδια σταθεροποίησης στο μέλλον.

Ως εκ τούτου είναι ορατή η ανάγκη για την διερεύνηση εναλλακτικών καυσίμων και συστημάτων πρόωσης τα οποία να είναι αποδοτικά, οικονομικά και με ελάχιστο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

1.3.1 Περιβαλλοντική νομοθεσία

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα προαναφερθέντα, υπάρχει μια αυξανόμενη εθνική και παγκόσμια ανησυχία που εντείνεται στον τομέα των περιβαλλοντικών θεμάτων που επηρεάζουν τη ναυτιλιακή βιομηχανία. Αυτές οι ανησυχίες επικεντρώνονται στην προστασία της θαλάσσιας βιοποικιλότητας και τη διατήρηση της απόδοσης των καυσίμων. Σε επίπεδο Ε.Ε., διαχρονικά έχουν θεσπιστεί διάφοροι κανονισμοί και οδηγίες στο πεδίο αυτό.

Από το 2000, με την οδηγία 2000/60 θεσπίστηκε ένα πλαίσιο για την προστασία των εσωτερικών επιφανειακών υδάτων, των μεταβατικών υδάτων, των παράκτιων και των υπόγειων υδάτων. Ύστερα, 2002, με τη οδηγία 2002/59 καθιερώθηκε για τα κράτη της Ε.Ε. ένα σύστημα παρακολούθησης της κυκλοφορίας των πλοίων και παροχής πληροφοριών για την ποιότητα/ρύπανση των υδάτων με σκοπό τη βελτίωση της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας της θαλάσσιας κυκλοφορίας, τη βελτίωση της αντίδρασης των αρχών σε συμβάντα, ατυχήματα ή δυνητικά επικίνδυνες καταστάσεις στη θάλασσα, συμπεριλαμβανομένων των επιχειρήσεων έρευνας και διάσωσης, και συμβάλλοντας στην καλύτερη πρόληψη και ανίχνευση της ρύπανσης από τα πλοία (Europa.eu, 2021).

Το 2014 με την οδηγία 2014/94/EU θεσπίστηκε ένα κοινό πλαίσιο μέτρων για την ανάπτυξη υποδομών για την αξιοποίηση εναλλακτικών καυσίμων στην ΕΕ, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η εξάρτηση από το πετρέλαιο και να μετριαστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μεταφορών. Η οδηγία αυτή καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις για τη δημιουργία υποδομών εναλλακτικών καυσίμων που πρέπει να εφαρμοστούν μέσω των εθνικών πλαισίων πολιτικής των κρατών μελών.

Γενικότερα, κατά τα επόμενα έτη δόθηκε μεγάλη βάση μέσω των οδηγιών που θεσπίστηκαν στην προστασία του περιβάλλοντος από τη θαλάσσια ρύπανση. Ωστόσο για πρώτη φορά το 2016, με την οδηγία 2016/802 τέθηκε σαν στόχος η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του θείου που προκύπτουν από την καύση ορισμένων τύπων υγρών καυσίμων και η μείωση των επιβλαβών επιπτώσεων τέτοιων εκπομπών για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Θεσπίστηκαν συγκεκριμένα όρια στην περιεκτικότητα των καυσίμων αυτών σε θείο ως προϋπόθεση για τη χρήση τους στο έδαφος, τις χωρικές θάλασσες και τις αποκλειστικές οικονομικές ζώνες ή ζώνες ελέγχου της ρύπανσης (Europra.eu, 2021).

Στη συνέχεια, το 2019 με την οδηγία 2019/904 θεσπίζονται μέτρα για τη μείωση του αντίκτυπου ορισμένων πλαστικών προϊόντων στο περιβάλλον, ιδίως στο υδάτινο περιβάλλον, και στην ανθρώπινη υγεία, καθώς και προωθείται η μετάβαση σε μια κυκλική οικονομία με καινοτόμα και βιώσιμα επιχειρηματικά μοντέλα, προϊόντα και υλικά.

Επίσης με την οδηγία 2019/883 θεσπίστηκαν κανόνες για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος από τις αρνητικές επιπτώσεις αποβλήτων από πλοία που χρησιμοποιούν λιμάνια που βρίσκονται στην ΕΕ, διασφαλίζοντας παράλληλα την ομαλή λειτουργία της θαλάσσιας κυκλοφορίας, βελτιώνοντας τη διαθεσιμότητα και τη χρήση κατάλληλων λιμενικών εγκαταστάσεων υποδοχής και την παράδοση απορριμμάτων στις εγκαταστάσεις αυτές (Europra.eu, 2021).

Από τα παραπάνω καταδεικνύεται ότι μέσα από την νομοθεσία αναζητούνται περιβαλλοντικά βιώσιμοι τρόποι για τη λειτουργία της βιομηχανίας της ναυτιλίας, με ιδιαίτερο προσανατολισμό προς τη χρήση περιβαλλοντικά βιώσιμων καυσίμων.

Κεφάλαιο 2: Ανάλυση προηγμένων καυσίμων

Η απαλλαγή από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στο ναυτιλιακό τομέα έχει προχωρήσει με αργούς σχετικά ρυθμούς λόγω των συγκριτικά χαμηλών εκπομπών CO₂. Ωστόσο, το 96% των καυσίμων που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία των πλοίων προέρχονται από το ναυτιλιακό πετρέλαιο Diesel (MDO), το βαρύ μαζούτ (HFO) ή το ναυτιλιακό gasoil (MGO), τα οποία παράγουν έως και 3,114 kg CO₂ ανά κιλό HFO που καίγεται. Εκτός από τις εκπομπές CO₂, ο ναυτιλιακός τομέας εκπέμπει περίπου 1,4 εκατομμύρια τόνους σωματιδίων (PM), σχεδόν το 15% των παγκόσμιων εκπομπών NO_x και περίπου το 13% των παγκόσμιων εκπομπών SO_x ετησίως.

Πλέον, η πλειονότητα των πλοίων χρησιμοποιεί μαζούτ με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο (VLSFO) για να συμμορφωθεί με τα νέα όρια της νομοθεσίας και μέχρι σήμερα δεν έχει αναφερθεί κανένα θέμα ασφάλειας στον IMO. Οι πλοιοκτήτες μπορούν επίσης να χρησιμοποιούν καύσιμα χαμηλής ή μηδενικής περιεκτικότητας σε θείο, για παράδειγμα, LNG ή βιοκαύσιμα. Οι επιλογές για τα εναλλακτικά καύσιμα πλοίων που συζητούνται παγκοσμίως περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων το LNG, το υδρογόνο, την αμμωνία, τη μεθανόλη και τα βιοκαύσιμα. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι επενδύσεις είναι μακροπρόθεσμες - καθώς τα πλοία σχεδιάζονται με μεγάλη διάρκεια ζωής - δημιουργούνται διλήμματα. Κάθε ένα από τα καύσιμα που συζητούνται έχει πλεονεκτήματα και αδυναμίες - απαιτείται μια σωστή ποσοτική σύγκριση για να προετοιμαστούν οι ενδιαφερόμενοι, οι πλοιοκτήτες και οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής για τη μετάβαση σε μια νέα εποχή εναλλακτικών καυσίμων.

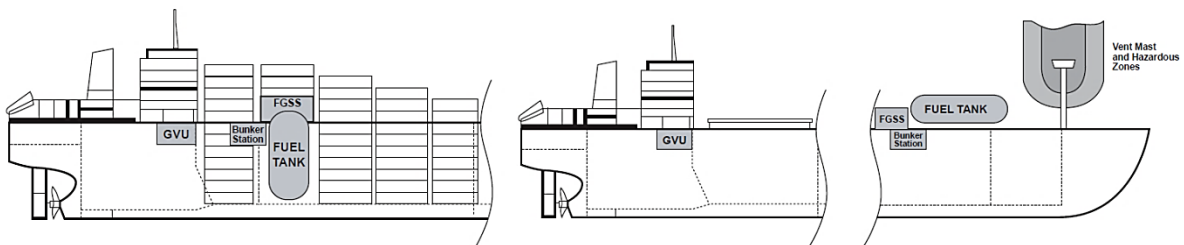
2.1 Υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG)

Το LNG είναι ένα μείγμα διαφορετικών αερίων σε υγρή μορφή, που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο (CH₄) σε ποσοστό που κυμαίνεται από 70 έως 99% κατά μάζα, ανάλογα με την προέλευση του φυσικού αερίου. Άλλοι υδρογονάνθρακες που βρίσκονται συνήθως στο LNG είναι το αιθάνιο (C₂H₆), το προπάνιο (C₃H₈) και το βουτάνιο (C₄H₁₀), ενώ μπορεί επίσης να υπάρχουν μικρές ποσότητες άλλων αερίων, όπως το άζωτο (N₂). Τα εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα φυσικού αερίου είναι σημαντικά - ο Διεθνής Οργανισμός

Ενέργειας (IEA) εκτιμά ότι τα αποθέματα με τους τρέχοντες ρυθμούς χρήσης αρκούν για να καλύψουν τις μελλοντικές ανάγκες για σχεδόν 250 χρόνια. Όταν υγροποιείται στους -162 °C, ο όγκος του φυσικού αερίου μειώνεται στο 1/600 περίπου του όγκου που απαιτείται όταν βρίσκεται στην αέρια φάση. Σε αυτή την κατάσταση, το LNG αποθηκεύεται σε δεξαμενές όπου η εισροή θερμότητας οδηγεί στην παραγωγή αερίου βρασμού (BOG). Το BOG τροφοδοτεί τους κινητήρες ή υγροποιείται εκ νέου για να διατηρείται η πίεση της δεξαμενής LNG εντός αποδεκτών ορίων.

Το LNG ως καύσιμο είναι μία από τις επιλογές που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογικές και λειτουργικές βελτιώσεις, για την επίτευξη των στόχων μείωσης του CO₂ του που έχει θέσει ο IMO 2030. Υπολογίζεται ότι η μετάβαση σε LNG μπορεί να μειώσει το αποτύπωμα CO₂ των πλοίων έως και 20%. Σε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, το πρώτο βήμα θα ήταν η συγκριτική αξιολόγηση του στόλου, για τον οποίο σχεδιάζεται η μείωση των εκπομπών. Στη συνέχεια, είναι απαραίτητο να εξεταστεί το προβλεπόμενο προφίλ λειτουργίας του σκάφους και να προσδιοριστεί πώς ένα πλοίο με καύσιμο LNG θα λειτουργούσε για την πλοιοκτήτρια εταιρία και ποιο θα ήταν το οικονομικό και το περιβαλλοντικό όφελος. Ο αντίκτυπος του προφίλ λειτουργίας δεν πρέπει να υποτιμάται, καθώς ανάλογα με το επιλεγμένο σύστημα καυσίμου ένα σκάφος μπορεί τελικά να μην έχει την αναμενόμενη μείωση 20%.

Για πλοία που τροφοδοτούνται με LNG, τα κύρια συστήματα που πρέπει να ενσωματωθούν και που είναι διαφορετικά ή πρόσθετα σε σχέση με τα συμβατικά σχέδια ενός πλοίου είναι το σύστημα περιορισμού καυσίμου LNG, ο σταθμός ανεφοδιασμού και οι σωληνώσεις μεταφοράς LNG, ένα σύστημα παροχής αερίου καυσίμου, η βαλβίδα του αερίου, η μονάδα παραγωγής αζώτου, τα συστήματα σωληνώσεων εξαερισμού και για ορισμένους τύπους δεξαμενών LNG, πρόσθετος εξοπλισμός για τη διαχείριση της θερμοκρασίας και της πίεσης της δεξαμενής. (ABS, 2022)



Σχήμα 2.1 Τυπικό παράδειγμα θέσης δεξαμενών LNG και κύριου εξοπλισμού. (ABS, 2022)

2.2 Μεθανόλη

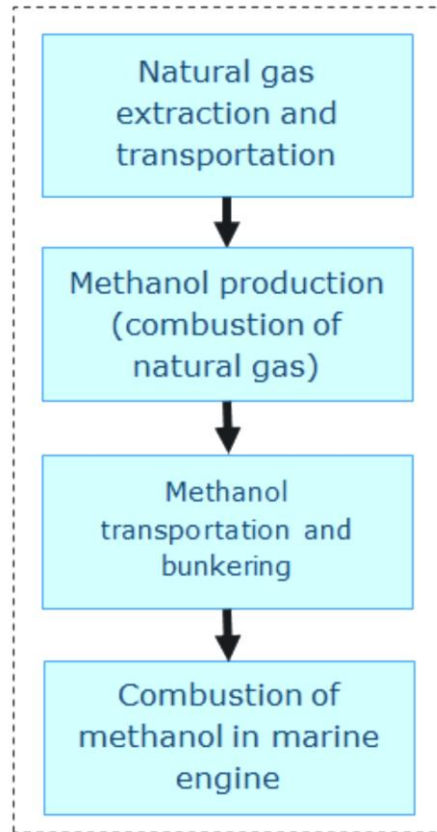
Η μεθανόλη, επίσης γνωστή ως μεθυλική αλκοόλη ή ξυλόλη, είναι μια χημική ουσία με τύπο CH_3OH . Το μεγαλύτερο μέρος της μεθανόλης που παράγεται σήμερα χρησιμοποιείται στην πετροχημική βιομηχανία, ως πρώτη ύλη για την παραγωγή άλλων χημικών ουσιών, ιδίως φορμαλδεΰδης και οξικού οξέος.

Η μεθανόλη έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον ως εναλλακτικό καύσιμο με χαμηλές εκπομπές άνθρακα, κυρίως επειδή η παραγωγή της είναι δυνατή από ανανεώσιμες πρώτες ύλες, όπως τα αστικά και βιομηχανικά απόβλητα, η βιομάζα και το διοξείδιο του άνθρακα. Η μεθανόλη χρησιμοποιείται σε σημαντικό βαθμό ως καύσιμο μεταφοράς για αυτοκίνητα στην Κίνα, καθώς είναι φθηνή και άμεσα διαθέσιμη. Η μεθανόλη στην Κίνα παράγεται από άνθρακα, γεγονός που προκαλεί εξαιρετικά αρνητικές επιπτώσεις στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Η χρήση μεθανόλης στη ναυτιλιακή βιομηχανία είναι προς το παρόν περιορισμένη – έως τώρα υπάρχουν επτά δεξαμενόπλοια υπό κατασκευή τα οποία προορίζονται να μεταφέρουν μεθανόλη και να χρησιμοποιούν ως καύσιμο το φορτίο τους. (DNV-GL, 2016)

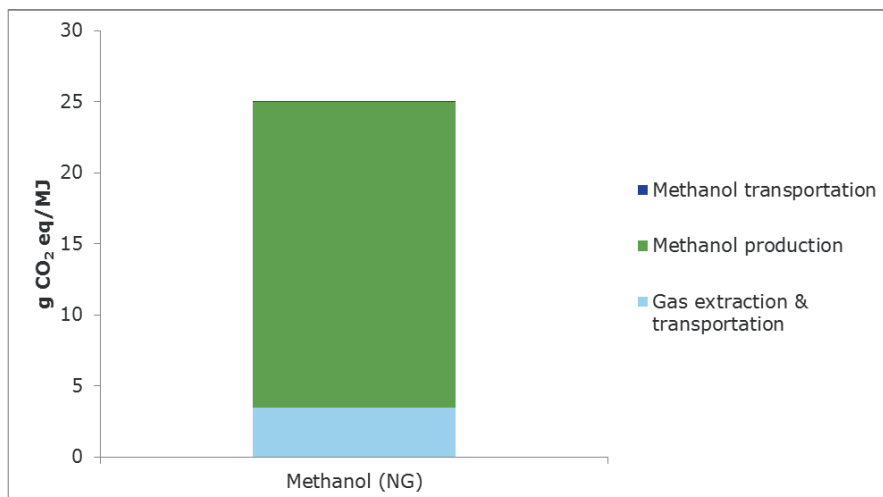
2.2.1 Παραγωγή – καύση μεθανόλης

Αυτή τη στιγμή, η μεγαλύτερη ποσότητα μεθανόλης παγκοσμίως παράγεται μέσω της σύνθεσης φυσικού αερίου. Η παραγωγή μεθανόλης από το φυσικό αέριο προαπαιτεί ένα συνδυασμό αναμόρφωσης ατμού και μερικής οξειδωσης, με ενεργειακή απόδοση που πλησιάζει το 70%. Οι κύριες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που εμφανίζονται κατά τη διαδικασία παραγωγής της μεθανόλης είναι οι εκπομπές από την καύση φυσικού αερίου. Η διαδικασία παραγωγής μεθανόλης είναι ισχυρά εξώθερμη και η περίσσεια θερμότητας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μια ηλεκτροπαραγωγική μονάδα. Ως εκ τούτου, μπορεί να υποθεθεί ότι δεν υπάρχουν επιπλέον εισροές ενέργειας στη διαδικασία παραγωγής της μεθανόλης και ότι δεν προκύπτουν επιπλέον εκπομπές πέρα από αυτές που αφορούν την καύση του φυσικού αερίου. Ο κύκλος ζωής της παραγωγής μεθανόλης από φυσικό αέριο εμφανίζεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Οι φάσεις του κύκλου ζωής της παραγωγής και χρήσης μεθανόλης ως καυσίμου στα πλοία (DNV-GL, 2016)

Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τη παραγωγή μεθανόλης από φυσικό αέριο προέρχονται κυρίως από την καύση του φυσικού αερίου στο εργοστάσιο παραγωγής μεθανόλης. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την εξόρυξη του φυσικού αερίου έως και τη μεταφορά της μεθανόλης εμφανίζονται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3 Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από μεθανόλη που παράγεται με φυσικό αέριο (DNV-GL, 2016)

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, οι εκπομπές που προκύπτουν από τη μεταφορά της μεθανόλης είναι πρακτικά αμελητέες.

Αναφορικά με τη χρήση του καυσίμου, οι εκπομπές CO₂ από την καύση της μεθανόλης βασίζονται στην περιεκτικότητα του καυσίμου σε άνθρακα ανά MJ ενέργειας. Η περιεκτικότητα σε άνθρακα μπορεί να ποικίλλει ελαφρώς ανάλογα με την καθαρότητα του καυσίμου - ένας παράγοντας ωστόσο που ελέγχεται απόλυτα κατά τη παραγωγική διαδικασία.

Η βιομεθανόλη θεωρείται κλιματικά ουδέτερο καύσιμο και επομένως το CO₂ που προέρχεται από την καύση της δεν θεωρείται αέριο του θερμοκηπίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το CO₂ που εκπέμπεται από ένα καύσιμο που έχει ως βάση τη βιομάζα απομακρύνεται από την ατμόσφαιρα μόλις αναπτυχθεί νέα βιομάζα. Επίσης οι εκπομπές CH₄ και N₂O από τη μεθανόλη θεωρούνται αμελητέες, όπως και οι εκπομπές SO_x, που βασίζονται στην περιεκτικότητα της μεθανόλης σε θείο, η οποία και αυτή θεωρείται αμελητέα. Όσον αφορά τις εκπομπές NO_x από τη μεθανόλη, έχουν πραγματοποιηθεί δοκιμές για τον υπολογισμό τους. Η Wärtsilä έχει εκτελέσει δοκιμές για τον προσδιορισμό των εκπομπών NO_x από τη μεθανόλη έναντι εκείνων από το HFO σε δύο μοντέλα κινητήρων. Τα αποτελέσματά έδειξαν ότι οι εκπομπές NO_x ήταν μειωμένες κατά 60% σε σύγκριση με το HFO. Οι δοκιμές έδειξαν επίσης ότι η απόδοση του καυσίμου είναι οριακά καλύτερη ή ίδια σε σχέση με τα παραδοσιακά ναυτιλιακά καύσιμα. (DNV-GL, 2016)

Ως εκ τούτου, θεωρείται ότι η ενεργειακή απόδοση των ναυτιλιακών κινητήρων παραμένει αμετάβλητη όταν λειτουργούν με μεθανόλη. Αν και παρατηρήθηκε αυξημένη κατανάλωση λιπαντικού κατά τη λειτουργία με μεθανόλη, αυτός ο παράγοντας θεωρήθηκε αμελητέος. Η MAN Diesel διεξήγαγε αντίστοιχα δοκιμές με μεθανόλη σε ναυτιλιακούς κινητήρες με αποτέλεσμα τη μείωση των εκπομπών NO_x κατά 30% σε σύγκριση με το πετρέλαιο Diesel. (DNV-GL, 2016)

Αν και οι παράμετροι του κινητήρα επηρεάζουν τη σύσταση των ρύπων, σε γενικές γραμμές οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που προκύπτουν από την καύση της μεθανόλης εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα.

| Συστατικό | Εκπομπές (g/MJ μεθανόλης) |
|------------------|---------------------------|
| CO ₂ | 69 |
| CH ₄ | 0 |
| N ₂ O | 0 |
| NO _x | 0.4 |
| SO _x | 0 |

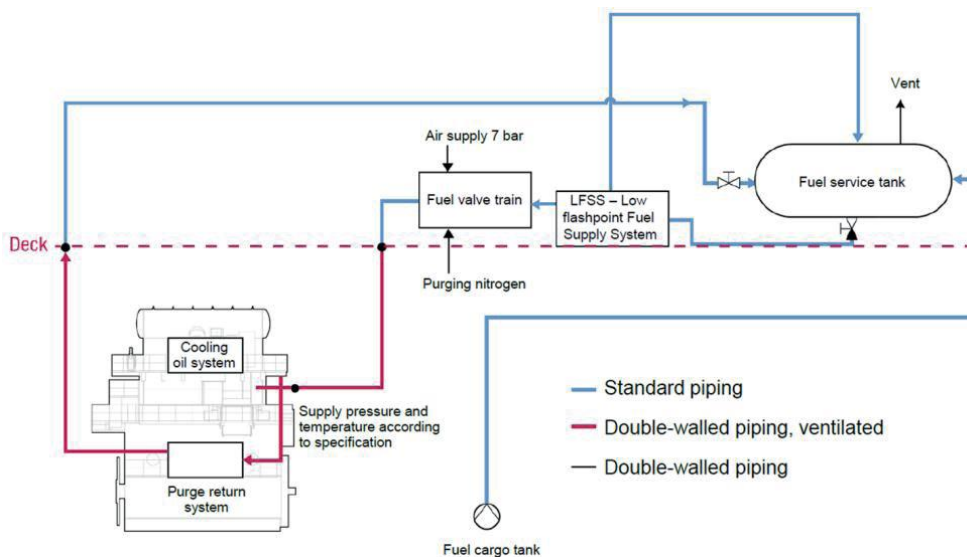
Πίνακας 2.1 Εκπομπές από την καύση της μεθανόλης (DNV-GL, 2016)

2.2.2 Σύστημα καυσίμου μεθανόλης

Τα βασικά στοιχεία του συστήματος καύσης της μεθανόλης εμφανίζονται παρακάτω:

- Δεξαμενή μεθανόλης
- Αποθήκευση μεθανόλης στο πλοίο
- Προώθηση της μεθανόλης προς τον κύριο κινητήρα
- Καύση μεθανόλης στον κύριο κινητήρα
- Χειρισμός και επεξεργασία μεθανόλης μετά τον κύριο κινητήρα

Αυτά τα στοιχεία αποτελούν ολόκληρο το σύστημα καυσίμου μεθανόλης, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4.



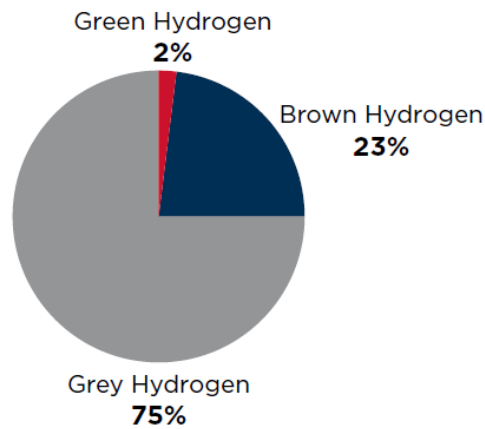
Σχήμα 2.4 Σύστημα καυσίμου μεθανόλης (Stubner)

2.3 Υδρογόνο

Το υδρογόνο βρίσκεται στη φύση συνήθως ως ένωση του νερού ή του μεθανίου. Για την παραγωγή καθαρού υδρογόνου, πρέπει να γίνει απομόνωση του υδρογόνου από τις παραπάνω ενώσεις. Σε συνθήκες δωματίου, το υδρογόνο είναι ένα άχρωμο, άοσμο, άγευστο, μη τοξικό, σχετικά μη αντιδραστικό και πολύ εύφλεκτο αέριο.

Το υδρογόνο παράγεται συνήθως μετατρέποντας το φυσικό αέριο σε αέριο υδρογόνο και CO₂ (syngas), αν και για να επιτευχθούν οι μακροπρόθεσμοι στόχοι βιωσιμότητας, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ανανεώσιμη ενέργεια για την παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης. Τα τελευταία χρόνια, η βιομηχανία έχει αναγνωρίσει τη δυνατότητα του υδρογόνου να παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω κυψελών καυσίμου. Ενώ σε πολλές περιπτώσεις το υδρογόνο μπορεί να προέρχεται από την αναμόρφωση ενός καυσίμου - φορέα υδρογόνου - και επομένως μπορεί να έχει άμεσες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου - σε μια κυψέλη καυσίμου που καταναλώνει καθαρή παροχή καυσίμου υδρογόνου, δεν εκπέμπονται αέρια θερμοκηπίου. Σε κινητήρες εσωτερικής καύσης ή αεριοστρόβιλους, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Αν και το υδρογόνο φαίνεται να είναι ένα ιδανικό καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας, υπάρχουν διάφορες προκλήσεις που σχετίζονται με αυτό το καύσιμο, όπως οι προηγμένες απαιτήσεις αποθήκευσης και μετριασμού του κινδύνου πυρκαγιάς. Για να γίνει ένα ανταγωνιστικό εναλλακτικό καύσιμο για τη ναυσιπλοΐα, το υδρογόνο πρέπει να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις της διαθεσιμότητας και του υψηλού κόστους για την κλιμάκωση των υποδομών παραγωγής και μεταφοράς.



Σχήμα 2.5 Ποσοστό Παγκόσμιας Παραγωγής βάσει των διαφόρων τύπων υδρογόνου (ABS, 2021)

2.3.1 Παραγωγή υδρογόνου

Οι εκπομπές από την παραγωγή υδρογόνου αποτελούν την πλειοψηφία των ρύπων που σχετίζονται με το συγκεκριμένο καύσιμο. Υπάρχουν τέσσερις τύποι υδρογόνου που σχετίζονται με τις εκπομπές που απελευθερώνονται κατά την παραγωγή του:

- Καφέ υδρογόνο, που παράγεται από την επεξεργασία του άνθρακα
- Γκρίζο υδρογόνο, που παράγεται από την επεξεργασία άλλων ορυκτών καυσίμων ή φυσικού αερίου
- Μπλε υδρογόνο, που παράγεται από την επεξεργασία ορυκτών καυσίμων και συνοδεύεται από τεχνολογίες ελέγχου των εκπομπών, συμπεριλαμβανομένων μεθόδων δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα
- Πράσινο υδρογόνο, που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συνήθως μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορεί να

περιλαμβάνουν την ηλιακή ή αιολική ενέργεια για την παραγωγή καθαρού υδρογόνου με μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα

Το γκρίζο υδρογόνο που παράγεται από το φυσικό αέριο είναι η κύρια μέθοδος παραγωγής υδρογόνου, όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα, αντιπροσωπεύοντας το 75% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου. Το καφέ υδρογόνο είναι η δεύτερη μεγαλύτερη πηγή παραγωγής υδρογόνου, κυρίως στην Κίνα. Η παραγωγή πράσινου υδρογόνου συμβάλλει μόνο κατά το 2% στην παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου, ενώ η παραγωγή μπλε υδρογόνου δεν είναι ακόμη ευρέως διαδεδομένη.

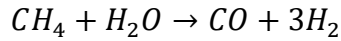
Η δέσμευση και αποθήκευση του άνθρακα περιλαμβάνει τη συλλογή, μεταφορά, επαναχρησιμοποίηση και αποθήκευση των εκπομπών CO₂ που διαχωρίζονται από άλλα αέρια που προέρχονται από την καύση των ορυκτών καυσίμων. Γενικά, η παραγωγή υδρογόνου είναι μια διαδικασία υψηλής κατανάλωσης ενέργειας. Προς το παρόν η ενέργεια που χρησιμοποιείται παγκοσμίως για την παραγωγή υδρογόνου είναι περίπου 275 Mtoe (εκατομμύρια τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου), που αντιστοιχεί στο δύο τοις εκατό της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης. Το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης τροφοδοτείται από τα διυλιστήρια ορυκτών καυσίμων και την παραγωγή αμμωνίας για λιπάσματα.

Η παραγωγή γκρίζου υδρογόνου είναι μια διαδικασία εντάσεως άνθρακα και κυμαίνεται από 71 kg CO₂/MJ H₂ για το φυσικό αέριο έως 166 kg CO₂/MJ H₂ για τον άνθρακα. Ωστόσο, αυτές οι εκπομπές μπορούν να μειωθούν ή να εξαιρεθούν με την εφαρμογή της τεχνολογίας δέσμευσης και αποθήκευσης του άνθρακα.

Η παραγωγή υδρογόνου από φυσικό αέριο επιτυγχάνεται μέσω αναμόρφωσης χρησιμοποιώντας τρεις καθιερωμένες μεθόδους:

- (i) Αναμόρφωση με ατμό, η οποία χρησιμοποιεί το νερό ως οξειδωτικό καθώς και μια πηγή υδρογόνου.
- (ii) Μερική οξείδωση, η οποία χρησιμοποιεί το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα παρουσία καταλύτη
- (iii) Αυτοθερμική αναμόρφωση, η οποία είναι ένας συνδυασμός των δύο πρώτων μεθόδων αναμόρφωσης.

Σε κάθε περίπτωση, σχηματίζεται αέριο σύνθεσης – γνωστό και ως syngas – το οποίο αποτελείται από μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο και στη συνέχεια μετατρέπεται σε υδρογόνο και CO₂ μέσω της αντίδρασης μετατόπισης νερού-αερίου. Η αντίδραση εμφανίζεται παρακάτω:



Για τη μείωση της έντασης άνθρακα στην παραγωγή υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί βιομάζα από ανανεώσιμες πηγές και βιώσιμες πηγές για την παραγωγή αερίου σύνθεσης μέσω αεριοποίησης. Οι πυρηνικοί σταθμοί μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή υδρογόνου από την αναμόρφωση με ατμό του μεθανίου ή τη θερμοχημική παραγωγή υψηλής θερμοκρασίας, εξαλείφοντας εκείνες τις μεθόδους παραγωγής υδρογόνου που βασίζονται στην καύση ορυκτών καυσίμων.

Εναλλακτικά, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ηλεκτρόλυση του νερού. Οι συσκευές ηλεκτρόλυσης λειτουργούν ουσιαστικά ως ανεστραμμένες κυψέλες καυσίμου, όπου το νερό και η ηλεκτρική ενέργεια συνδυάζονται και παράγουν υδρογόνο και αέριο οξυγόνο. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η αιολική, η ηλιακή ή η πυρηνική ενέργεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου μέσω αυτής της διαδικασίας. Σε αυτή την περίπτωση, το υδρογόνο μπορεί να θεωρηθεί ως ανανεώσιμο καύσιμο με μηδενική επίδραση άνθρακα κατά την παραγωγή. Άλλες διαδικασίες παραγωγής υδρογόνου περιλαμβάνουν τη διάσπαση του νερού σε υψηλή θερμοκρασία, τη φωτοβιολογική διάσπαση του νερού και τη φωτοηλεκτροχημική διάσπαση του νερού, ωστόσο αυτές οι μέθοδοι δεν χρησιμοποιούνται ακόμη σε μεγάλης κλίμακας παραγωγή υδρογόνου.

Είναι χρήσιμο να σημειωθεί, όταν εξετάζονται εναλλακτικές προς την παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση λύσεις, ότι ο υψηλός βαθμός καθαρότητας που απαιτείται για την ικανοποίηση του προτύπου καθαρότητας βαθμού 4,5 - δηλαδή 99,995 % καθαρότητα για κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) - μπορεί να αυξήσει το κόστος παραγωγής. Αντίθετα, οι κινητήρες καύσης μονού και διπλού καυσίμου δεν απαιτούν αυτό το επίπεδο καθαρότητας και πράγματι μπορούν να τροφοδοτηθούν με μείγματα υδρογόνου – για παράδειγμα με μεθάνιο, διοξείδιο ή μονοξείδιο του άνθρακα - που διαφορετικά θα προκαλούσαν σημαντική υποβάθμιση σε μια κυψέλη καυσίμου PEM.

Ωστόσο, αυτό το πρότυπο καθαρότητας μπορεί να μην αποτελεί πρόβλημα σε άλλες κυψέλες καυσίμου, όπως κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC), αν και ο συγκεκριμένος τύπος εμφανίζει συμβιβασμούς που σχετίζονται με τις εκπομπές αερίων, τη χαμηλότερη απόδοση λειτουργίας και τις υψηλές θερμοκρασίες. Όταν η παραγωγή και η κατανάλωση υδρογόνου είναι διαδικασίες μηδενικών εκπομπών, οι μόνες εκπομπές του κύκλου ζωής παράγονται από τις διαδικασίες αποθήκευσης και μεταφοράς του καυσίμου κατά τη διανομή καθώς και από οποιαδήποτε απαιτούμενη διαδικασία μετατροπής μεταξύ των μεταφορέων.

2.3.2 Το υδρογόνο ως καύσιμο στη ναυτιλία

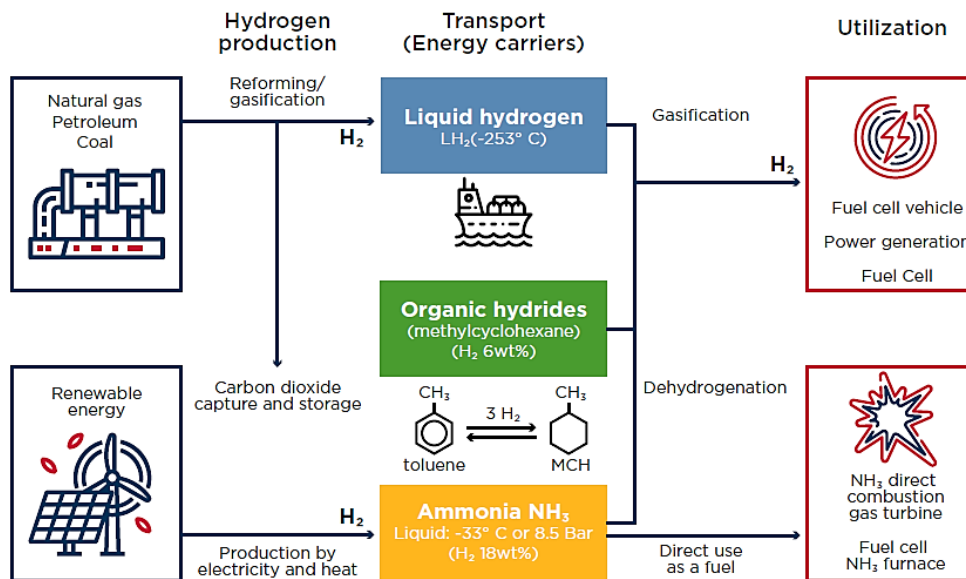
Το υδρογόνο χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μάζα από όλα τα χημικά καύσιμα στα 120,2 MJ/kg, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.2 σε σύγκριση με άλλα καύσιμα πλοίων. Όσον αφορά την ενέργεια μάζας, υπερβαίνει το ναυτιλιακό gasoil κατά 2,8 φορές και τις αλκοόλες κατά πέντε έως έξι φορές. Επομένως, το καύσιμο υδρογόνο μπορεί να αυξήσει την αποτελεσματική απόδοση ενός κινητήρα και να συμβάλει στη μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου. Ωστόσο, σε ογκομετρική βάση, λόγω της χαμηλότερης ογκομετρικής ενεργειακής του πυκνότητας, το υγρό υδρογόνο μπορεί να απαιτεί τέσσερις φορές περισσότερο αποθηκευτικό χώρο από το ναυτιλιακό gasoil ή περίπου δύο φορές περισσότερο χώρο από το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) για ισοδύναμη ποσότητα μεταφερόμενης ενέργειας. Είναι επίσης σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σύγκριση της ενέργειας των καυσίμων και η ενεργειακή απόδοση του κινητήρα ή οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας στις κυψέλες καυσίμου. Το υδρογόνο απαιτεί χαμηλές θερμοκρασίες, κάτω από -253 °C για να υγροποιηθεί. Λόγω αυτής της πολύ χαμηλής θερμοκρασίας, ο απαιτούμενος όγκος για την αποθήκευση υγρού υδρογόνου θα μπορούσε να είναι ακόμη μεγαλύτερος, καθώς απαιτούνται επιπρόσθετα στρώματα υλικών ή μόνωση κενού για την κρυογονική αποθήκευση καθώς και άλλες ρυθμίσεις. (ABS, 2021)

| Χαρακτηριστικά | MM | H ₂ | Marine gasoil | LNG | Methanol | Ammonia |
|----------------------------|-------------------|----------------|---------------|------|----------|---------|
| Σημείο βρασμού | °C | -253 | 180-360 | -161 | 65 | -33 |
| Πυκνότητα | kg/m ³ | 70.8 | 900 | 430 | 790 | 696 |
| Ενεργειακό περιεχόμενο | MJ/kg | 120.2 | 42,7 | 48 | 28.7 | 22.5 |
| Θερμοκρασία αυτανάφλεξης | °C | 585 | 250 | 537 | 350 | 630 |
| Σημείο ανάφλεξης | °C | - | > 60 | -188 | 11 | 132 |
| Ενεργειακή πυκνότητα υγρού | MJ/L | 8.51 | 38.4 | 20.6 | 15.7 | 15.7 |

Πίνακας 2.2 Ιδιότητες του υδρογόνου σε σύγκριση με άλλα ναυτιλιακά καύσιμα (ABS, 2021)

Το υδρογόνο μπορεί επίσης να αποθηκευτεί σε άλλα υλικά, όπως τα υδρίδια μετάλλων. Αυτή η μέθοδος αποθήκευσης δεσμεύει χημικά υδρογόνο σε πορώδη υδρίδια μετάλλων, με εφαρμογή μέτριας πίεσης και θερμότητας. Στη συνέχεια, το υδρογόνο εξάγεται αφαιρώντας την πίεση και τη θερμότητα. Αν και είναι τεχνολογικά εφικτό και ασφαλές, τα υδρίδια μετάλλων και άλλες μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου σε στερεά υλικά μπορεί να μην είναι μια αποτελεσματική λύση για την αποθήκευση υδρογόνου στα πλοία.

Λόγω των προκλήσεων που σχετίζονται με την αποθήκευση σε χαμηλή θερμοκρασία ή υψηλή πίεση, το υδρογόνο μπορεί εναλλακτικά να μεταφερθεί σε άλλα χημικά καύσιμα όπως η αμμωνία ή η μεθανόλη. Αυτά τα καύσιμα μπορεί να απαιτούν λιγότερη ενέργεια από αυτή που απαιτείται για την ψύξη του υγροποιημένου υδρογόνου ή για τη συμπίεση του αερίου υδρογόνου. Ορισμένες κυψέλες καυσίμου μπορούν να καταναλώσουν αμμωνία, μεθανόλη ή άλλα καύσιμα μεταφοράς υδρογόνου. Ωστόσο, αυτές οι τεχνολογίες ενδέχεται να απαιτούν υψηλότερη εισροή ενέργειας για την υδρογόνωση και την αναμόρφωση του καυσίμου και επομένως μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα λιγότερο αποδοτική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με την κατανάλωση καθαρού υδρογόνου στις κυψέλες καυσίμου. Το Σχήμα 2.6 δείχνει πώς η αμμωνία ως φορέας ενέργειας μπορεί να παίξει ρόλο στον κύκλο ζωής του καυσίμου υδρογόνου, είτε σε κατανάλωση σε μια κυψέλη καυσίμου είτε σε έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης.

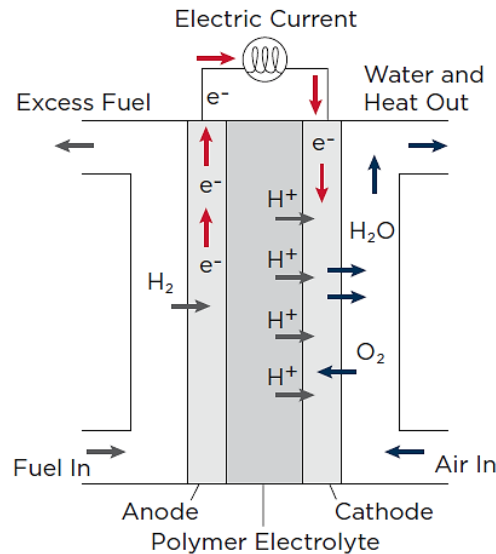


Σχήμα 2.6 Παραγωγή και χρήση Υδρογόνου και Αμμωνίας (Kobayashi, Hayakawa, Okafor, & Somarathne, 2018)

Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται ως φορείς μεταφοράς υδρογόνου καταναλώνονται συχνότερα σε κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μηδενικών εκπομπών, ανεξάρτητα από τον τρόπο παραγωγής του υδρογόνου. Υπάρχουν πολλές μελέτες κυψελών καυσίμου, κυρίως για την αξιολόγηση και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κυψελών καυσίμου. Υπάρχουν διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου, συμπεριλαμβανομένων των αλκαλικών ή SOFC, αλλά γενικά, όλοι οι τύποι κυψελών καυσίμου καταναλώνουν υδρογόνο και οξυγόνο και παράγουν θερμότητα, νερό και ηλεκτρική ενέργεια, όπως η κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων, που φαίνεται στο Σχήμα 2.7.

Τα μείγματα καυσίμων υδρογόνου αποτελούνται από υδρογόνο αναμειγμένο με ένα συμβατικό καύσιμο. Τα πιο κοινά είναι τα μείγματα υδρογόνου και LNG (HLNG) που μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές καυσαερίων και το αποτύπωμα των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ένα μείγμα υδρογόνου-κρυογονικού φυσικού αερίου (HCNG) μπορεί τυπικά να αποτελείται από έναν συνδυασμό 20% υδρογόνου και 80% συμπιεσμένου

φυσικού αερίου. Τα μείγματα υδρογόνου με φυσικό αέριο είναι πιο πιθανό να υιοθετηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε αεριοστρόβιλους.



Σχήμα 2.7 Σχηματική παράσταση λειτουργίας κυψέλης καυσίμου (Wikipedia, 2010)

Το υδρογόνο μπορεί επίσης να αναμιχθεί κατά την καύση με καύσιμο Diesel και ανάλογα με τις χρησιμοποιούμενες αναλογίες, οι μειώσεις των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NO_x) ενδέχεται να απαιτούν τη χρήση τεχνολογιών μετεπεξεργασίας καυσαερίων. Ενδέχεται να απαιτούνται και άλλες μικρές τροποποιήσεις στα συστήματα χρονισμού και ελέγχου για να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση του κινητήρα. (ABS, 2021)

2.4 Αμμωνία

Η αμμωνία είναι μια ένωση του αζώτου και του υδρογόνου και σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι ένα άχρωμο αέριο με χαρακτηριστική έντονη μυρωδιά. Σε υψηλότερες πιέσεις η αμμωνία γίνεται υγρό, καθιστώντας ευκολότερη τη μεταφορά και την αποθήκευση. Όπως τα περισσότερα εναλλακτικά καύσιμα, έχει χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τα καύσιμα με βάση το πετρέλαιο, επομένως η παραγωγή του ίδιου ποσού ενέργειας θα απαιτούσε περίπου 2,4 φορές περισσότερο όγκο σε σύγκριση με τα καύσιμα με βάση το πετρέλαιο. Οι ιδιότητες της αμμωνίας παρατίθενται στον Πίνακα 2.3.

| Ιδιότητα αμμωνίας | Τιμή |
|--|--------|
| Ενεργειακή πυκνότητα (MJ/L) | 12.7 |
| Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (MJ/kg) | 188 |
| Θερμοκρασία αυτανάφλεξης (°C) | 651 |
| Ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης (mJ) | 680 |
| Πυκνότητα υγρού (kg/m ³) | 600 |
| Αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας (1 bar) (°C) | 1,800 |
| Μοριακό βάρος (g/mol) | 17.031 |
| Σημείο τήξης (°C) | -77.7 |
| Σημείο βρασμού (°C) | -33.6 |
| Αριθμός κετανίου | 0 |
| Αριθμός οκτανίου | 130 |

Πίνακας 2.3 Ιδιότητες αμμωνίας (Jääskeläinen, 2022)

Η αμμωνία έχει αναγνωριστεί ως καύσιμο μηδενικών εκπομπών άνθρακα που μπορεί να εισέλθει στην παγκόσμια αγορά σχετικά γρήγορα και να συμβάλει στην επίτευξη του στόχου μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου για το 2050 που έχει τεθεί από τον IMO. Η αμμωνία προσφέρει στους πλοιοκτήτες και τους χειριστές ένα προφίλ μηδενικών εκπομπών άνθρακα ανεξάρτητα από την πηγή του καυσίμου. Παρά την τοξικότητά της και τις αυστηρές απαιτήσεις που αφορούν το χειρισμό της, οι κινητήρες αμμωνίας αναπτύσσονται ταχέως εφαρμόζοντας τις υπάρχουσες τεχνολογίες κινητήρων διπλού καυσίμου (DF). Σχέδια για κατασκευή πλοίων που τροφοδοτούνται με αμμωνία έχουν επίσης κοινοποιηθεί από κοινοπραξίες που περιλαμβάνουν σχεδιαστές πλοίων και ναυπηγεία.

Η αμμωνία έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις εξοπλισμού από τα περισσότερα εναλλακτικά καύσιμα και είναι ένα παγκόσμια εμπορεύσιμο προϊόν. Ωστόσο, για να καταστεί η αμμωνία μια εμπορικά βιώσιμη μακροπρόθεσμη επιλογή ως καύσιμο, θα πρέπει να κατασκευαστεί μια ολοκληρωμένη υποδομή από την πλευρά του εφοδιασμού και να αναπτυχθούν και να εφαρμοστούν νέοι αυστηροί κανονισμοί ασφαλείας. (ABS, 2020)

2.4.1 Η αμμωνία ως φορέας υδρογόνου

Το υδρογόνο προσφέρει υψηλή περιεκτικότητα σε ενέργεια ανά μάζα, υψηλή διαχυτικότητα και υψηλή ταχύτητα φλόγας. Το υδρογόνο ως καύσιμο έχει δοκιμαστεί σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, αεριοστρόβιλους και κυψέλες καυσίμου, ωστόσο απαιτεί κρυογονική αποθήκευση – θερμοκρασία μικρότερη από $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ - και ειδικά συστήματα παροχής καυσίμου. Απαιτείται σημαντική τεχνική πρόοδος για να θεωρηθεί το υδρογόνο ως μια βιώσιμη, μεγάλης κλίμακας, εμπορική επιλογή καυσίμου, ιδιαίτερα για τις θαλάσσιες εφαρμογές, αφού το ενεργειακό περιεχόμενο σε ογκομετρική βάση είναι χαμηλό για το υδρογόνο ($9,93\text{ GJ/m}^3$) και επομένως η εφαρμογή του θα επηρεάσει σημαντικά το σχεδιασμό του πλοίου. Η απώλεια ενέργειας κατά την αποθήκευση αποτελεί επίσης μια από τις προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν για την εφαρμογή.

Σε σύγκριση με το υδρογόνο, η αποθήκευση αμμωνίας είναι πιο πρακτική λόγω της ενεργειακής της πυκνότητας και της θερμοκρασίας υγροποίησης της. Αν και η αμμωνία είναι τοξική, χρησιμοποιείται στα πλοία ως αναγωγικό στα συστήματα Επιλεκτικής Καταλυτικής Αναγωγής (SCR) για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα. Επομένως, υπάρχει μεγάλη εμπειρία σχετικά με το χειρισμό της αμμωνίας στα πλοία.

Το ενδιαφέρον αυξάνεται για τη χρήση της αμμωνίας ως καύσιμο σε κυψέλες καυσίμου που τροφοδοτούνται με υδρογόνο από ιδιοκτήτες που χρησιμοποιούν πλοία μεταφοράς υγραερίου (LPG) που μεταφέρουν αμμωνία ως φορτίο. Άλλοι πλοιοκτήτες επιδιώκουν επίσης να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου χρησιμοποιώντας αμμωνία. Ενδιαφέρον για την αμμωνία επιδεικνύουν επίσης φορείς εκμετάλλευσης ηλεκτρικής ενέργειας που προμηθεύουν με πράσινη ηλεκτρική ενέργεια τα πλοία κατά τη διάρκεια της παραμονής τους στο λιμάνι, σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής σε απομακρυσμένα νησιά, εφεδρικές παροχές ρεύματος στη στεριά και χειριστές γεννητριών έκτακτης ανάγκης.

Μόλις το υδρογόνο απελευθερωθεί από την αμμωνία μπορεί να είναι μια άφθονη πηγή για τις κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα της αμμωνίας θα πρέπει να σταθμιστούν έναντι των απωλειών ενέργειας και του πρόσθετου εξοπλισμού που απαιτείται για τη μετατροπή της σε υδρογόνο προτού χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου. Ορισμένοι τύποι κυψελών καυσίμου μπορούν να αναμορφώσουν εσωτερικά το καύσιμο ώστε να λειτουργούν απευθείας με αμμωνία,

εξαλείφοντας την ανάγκη διαχωρισμού του υδρογόνου και του αζώτου πριν από την εισαγωγή. Ένα πρόβλημα με τη χρήση της αμμωνίας ως καυσίμου είναι η υψηλή συγκέντρωση αμμωνίας στο αέριο προϊόν. Αν και η συγκέντρωση μπορεί να είναι μικρότερη από 50 μέρη ανά εκατομμύριο (ppm), είναι αρκετή για να βλάψει τις κυψέλες καυσίμου με όξινους ηλεκτρολύτες και επομένως απαιτείται μια όξινη χημική ένωση για να αφαιρεθούν τα ίχνη της αέριας αμμωνίας.

Η αποθήκευση του υγρού υδρογόνου απαιτεί τουλάχιστον πέντε φορές περισσότερο όγκο σε σύγκριση με τα καύσιμα που έχουν ως βάση το πετρέλαιο, ενώ η αμμωνία απαιτεί περίπου 2,4 φορές περισσότερο όγκο. Ως εκ τούτου, ως μακροπρόθεσμη λύση, τα καύσιμα μηδενικού αποτυπώματος άνθρακα απαιτούν νέο σχεδιασμό των σκαφών και βελτιστοποίηση των λειτουργικών παραγόντων για να αποφευχθεί ο κίνδυνος των αναγκών ανεφοδιασμού ή του όγκου φορτίου. Ακόμα κι έτσι, η ευρεία χρήση της αμμωνίας σε βιομηχανικές και γεωργικές διεργασίες την καθιστά ελκυστικό από άποψη υλικοτεχνικής υποστήριξης και προσιτό καύσιμο που μπορεί να διανεμηθεί χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα υποδομή. (ABS, 2020)

2.4.2 Παραγωγή και αποθήκευση αμμωνίας

Σύμφωνα με το Γεωλογικό Ινστιτούτο των Ηνωμένων Πολιτειών, η παγκόσμια παραγωγή αμμωνίας το 2019 ήταν περίπου 150 εκατομμύρια τόνοι. Η μέση τιμή αμμωνίας για το έτος 2019 υπολογίστηκε σε 230 \$ USD ανά τόνο. Η παγκόσμια δυνατότητα παραγωγής αμμωνίας αναμένεται να αυξηθεί συνολικά κατά 4% στα επόμενα 4 χρόνια. Η αμμωνία δεν περιέχει άνθρακα και η σύνθεσή της από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μια διαδικασία που δεν περιλαμβάνει άνθρακα. Όπως το υδρογόνο, μπορεί να παραχθεί από ορυκτά καύσιμα χρησιμοποιώντας περιβαλλοντικά φιλικές μεθόδους όπως η δέσμευση και η αποθήκευση άνθρακα ή ανανεώσιμες πηγές ενέργεια, που μπορεί να επηρεάσουν την ανταγωνιστικότητά της ως προς το κόστος.

Η αμμωνία παράγεται σε μεγάλη κλίμακα από καύσιμα υδρογονανθράκων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υδρογόνου με την αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό. Το άζωτο που απαιτείται για την παραγωγή εξάγεται από τον αέρα μετά την υγροποίηση. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την

παραγωγή υδρογόνου από την ηλεκτρόλυση του νερού και αργότερα να συντεθεί σε αμμωνία, όπου σε αυτή την περίπτωση, η αμμωνία έχει μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα κατά την παραγωγή ή τη χρήση. Εάν επιτευχθεί η παραγωγή επαρκών ποσοτήτων αμμωνίας χρησιμοποιώντας τεχνολογία με ουδέτερο αποτύπωμα άνθρακα, η αμμωνία έχει σημαντικές δυνατότητες να οδηγήσει στην επίτευξη των στόχων μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου του IMO για το 2050.

Η αμμωνία έχει υψηλότερη ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας από το υγροποιημένο υδρογόνο, πολύ κοντά σε αυτή της μεθανόλης, γεγονός που μειώνει την ανάγκη για μεγαλύτερες δεξαμενές. Ο όγκος των δεξαμενών αποθήκευσης NH_3 είναι σημαντικά μικρότερος από εκείνον του υγρού υδρογόνου για τις ίδιες ενεργειακές απαιτήσεις - ακόμη περισσότερο λαμβάνοντας υπόψη τον απαιτούμενο όγκο θερμικής μόνωσης. Τα χαρακτηριστικά της αμμωνίας επιτρέπουν τη χρήση δεξαμενών τύπου C ή πρισματικών δεξαμενών και απαιτούν σημαντικά χαμηλότερη ενέργεια υγροποίησης σε σύγκριση με το υδρογόνο ή το LNG. Η αποθήκευση αμμωνίας σε βιομηχανική κλίμακα γίνεται συνήθως στους $-33,6\text{ }^\circ\text{C}$ καθώς κοστίζει λιγότερο από την αποθήκευση υπό υψηλή πίεση. Η ενέργεια που απαιτείται για την αποθήκευσή της αμμωνίας μπορεί να παραχθεί από πράσινες πηγές για να μειωθεί το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα. Η αμμωνία μπορεί να αποθηκευτεί σε υγρή μορφή υπό πίεση 8,6 bar και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος επί του σκάφους. (ABS, 2020)

2.4.3 Ασφάλεια

Η αμμωνία έχει ένα σχετικά στενό εύρος αναφλεξιμότητας σε σύγκριση με άλλα εναλλακτικά καύσιμα και είναι τοξική και πολύ αντιδραστική. Ως εκ τούτου, ο Διεθνής Κώδικας για την Κατασκευή και τον Εξοπλισμό Πλοίων που Μεταφέρουν Υγροποιημένα Αέρια (Κώδικας IGC) καθορίζει αυστηρές απαιτήσεις για τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά αμμωνίας και στα χαρακτηριστικά σχεδιασμού που απαιτείται να έχει μια μονάδα για να ελαχιστοποιήσει τον κίνδυνο έκθεσης του προσωπικού της σε δηλητηρίαση από NH_3 .

Η αμμωνία είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη και εμπορικά διαθέσιμη χημική ουσία. Είναι ταξινομημένη ως επικίνδυνη ουσία και υπόκειται σε αυστηρές απαιτήσεις που

περιλαμβάνουν τις εγκαταστάσεις που την παράγουν, την αποθηκεύουν ή τη χρησιμοποιούν σε σημαντικές ποσότητες. Το όριο οσμής για την αμμωνία είναι πολύ χαμηλό, κυμαίνεται από 0,037 έως 1,0 ppm, που σημαίνει ότι μπορεί να ανιχνευθεί από τους περισσότερους ανθρώπους σε χαμηλές συγκεντρώσεις που δεν αποτελούν κίνδυνο για την υγεία.

Η αμμωνία είναι τοξική για τον άνθρωπο και η έκθεση σε αυτή πρέπει να περιορίζεται στα επιτρεπόμενα όρια για την ασφάλεια του προσωπικού στο σκάφος. Σε χαμηλές συγκεντρώσεις, η αμμωνία μπορεί να είναι ερεθιστική για τα μάτια, τους πνεύμονες και το δέρμα και σε υψηλές συγκεντρώσεις ή μέσω άμεσης επαφής είναι απειλητική για τη ζωή. Τα συμπτώματα περιλαμβάνουν δυσκολία στην αναπνοή, πόνο στο στήθος, βρογχόσπασμους και στη χειρότερη περίπτωση, πνευμονικό οίδημα, όπου υγρό γεμίζει τους πνεύμονες και μπορεί να οδηγήσει σε αναπνευστική ανεπάρκεια. Η επαφή του δέρματος με υψηλές συγκεντρώσεις άνυδρης αμμωνίας μπορεί να προκαλέσει σοβαρά χημικά εγκαύματα. Η έκθεση στα μάτια μπορεί να προκαλέσει πόνο και υπερβολική δακρύρροια, αλλά και τραυματισμό του κερατοειδούς. Η οξεία έκθεση στην άνυδρη αμμωνία μπορεί να προκαλέσει ερυθρότητα, οίδημα, έλκη στο δέρμα και κρυοπαγήματα. Εάν έρθει σε επαφή με τα μάτια μπορεί να προκαλέσει πόνο, ερυθρότητα, οίδημα, βλάβη στην ίριδα και τον κερατοειδή, γλαύκωμα και καταρράκτη.

Η αμμωνία είναι επίσης χημικά ασυμβίβαστη με διάφορα βιομηχανικά υλικά και παρουσία υγρασίας αντιδρά και διαβρώνει τον χαλκό, τον ορείχαλκο, τον ψευδάργυρο και διάφορα άλλα κράματα. Η αμμωνία είναι ένας αλκαλικός αναγωγικός παράγοντας και αντιδρά με οξέα, αλογόνα και οξειδωτικά μέσα. Επομένως, τα υλικά σε ένα πλοίο πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά όταν χρησιμοποιείται αμμωνία. Σίδηρος, χάλυβας και ειδικά μη σιδηρούχα κράματα ανθεκτικά στην αμμωνία θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για δεξαμενές, αγωγούς και δομικά εξαρτήματα. (ABS, 2020)

2.4.4 Η αμμωνία ως καύσιμο στη ναυτιλία

Η αμμωνία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο είτε σε κινητήρα εσωτερικής καύσης είτε να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου. Ιστορικά, η αμμωνία χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ως καύσιμο για κινητήρες εσωτερικής καύσης το 1822 σε μια ατμομηχανή. Αργότερα, κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, χρησιμοποιήθηκε στο Βέλγιο ως καύσιμο για λεωφορεία στις δημόσιες συγκοινωνίες. Η αμμωνία έχει υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης, υψηλή θερμότητα εξάτμισης και στενό εύρος ευφλεκτότητας. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών, απαιτεί τυπικά έγχυση καυσίμου σε δίχρονους κινητήρες Diesel. Τα συστήματα έγχυσης υψηλής πίεσης μπορούν να βοηθήσουν στην ελαχιστοποίηση της ολίσθησης της αμμωνίας, μια σημαντική παράμετρος δεδομένης της τοξικότητάς της.

Όταν η αμμωνία τροφοδοτείται σε κινητήρες ανάφλεξης με συμπίεση, παράγονται σημαντικές ποσότητες NO_x λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων που εμπλέκονται. Το υποξείδιο του αζώτου (N_2O) είναι ένα ισχυρό αέριο του θερμοκηπίου με δυναμικό θέρμανσης περίπου 298 φορές μεγαλύτερο από το CO_2 για μια περίοδο 100 ετών. Ως εκ τούτου, η έρευνα και η ανάπτυξη του κινητήρα που τροφοδοτείται με αμμωνία πρέπει να επικεντρώνεται σε μια κατάλληλη τεχνολογία καύσης και επίσης να αξιολογεί τις εκπομπές καυσαερίων για να διασφαλίσει τη συμμόρφωση με τα όρια εκπομπών NO_x , να διερευνήσει πιθανά προβλήματα με το N_2O και να ελέγξει την άκαυστη αμμωνία σε επίπεδα αποδεκτά για τους κινητήρες εσωτερικής καύσης.

Η χρήση αμμωνίας σε κυψέλες καυσίμου είναι ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Ωστόσο, ο τρέχων ρυθμός ανάπτυξης επιταχύνεται, με μεγάλες σταθερές μονάδες παραγωγής να βρίσκονται υπό ανάπτυξη. Για να χρησιμοποιηθεί η NH_3 σε κυψέλες καυσίμου, το υδρογόνο που περιέχεται στο μόριο πρέπει να διαχωριστεί. Αν και τεχνικά αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός εξωτερικού αναμορφωτή, έτσι ώστε το υδρογόνο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας, όπως μεμβράνη πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEM), η χρήση αμμωνίας απευθείας σε κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας, όπως κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) μπορεί να είναι μια πιο αποτελεσματική λύση. Υπάρχουν επίσης πολλά πλεονεκτήματα της χρήσης αμμωνίας σε SOFC, όπως η υψηλή ηλεκτρική απόδοση, η απουσία παραγωγής NO_x και η έλλειψη κραδασμών.

Η ανάπτυξη κυψελών καυσίμου δεν είναι τεχνολογικά ώριμη όσο οι κινητήρες εσωτερικής καύσης και συνήθως έχει υψηλότερο κόστος. Αυτοί οι παράγοντες αναμένεται να βελτιωθούν σταδιακά καθώς η έρευνα συνεχίζεται. Ένα επιπλέον μειονέκτημα των κυψελών SOFC σε σύγκριση με τις κυψέλες PEM είναι η ευαισθησία των κεραμικών υλικών στερεού οξειδίου που χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση, η οποία απαιτεί σχετικά μακροχρόνιες και προσεκτικές διαδικασίες εκκίνησης και διακοπής λειτουργίας και συχνά διαρκεί για ώρες. Στην ιδανική περίπτωση, οι μονάδες SOFC θα πρέπει να λειτουργούν συνεχώς για να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος μόνιμης βλάβης. Αυτό θα απαιτούσε τυπικά τη χρήση μπαταριών για αποθήκευση ενέργειας για την αντιμετώπιση των διακυμάνσεων στη ζήτηση φορτίου.

Η αργή ταχύτητα φλόγας, η θερμοκρασία ανάφλεξης, το στενό εύρος αναφλεξιμότητας και η χαμηλή θερμότητα καύσης είναι ζητήματα για τους κινητήρες που χρησιμοποιούν ως καύσιμο αμμωνία. Οι στρατηγικές ελέγχου από τους κατασκευαστές κινητήρων μπορούν να αντιμετωπίσουν αυτά τα ζητήματα. Η έλευση του ηλεκτρονικού ελέγχου του κινητήρα και των υπαρχουσών τεχνολογιών DF, συμπεριλαμβανομένης των διαδικασιών που χρησιμοποιούνται από τον κινητήρα ME-LGI της εταιρίας MAN Energy Solution, δείχνει πολλά υποσχόμενη για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων στο εγγύς μέλλον. Η αμμωνία έχει υψηλή θερμότητα εξάτμισης (1.371 kJ/kg), η οποία οδηγεί σε σημαντική ψύξη του μείγματος μετά την έγχυση και μειώνει τη θερμοκρασία του κυλίνδρου κατά την έναρξη της καύσης, βοηθώντας στον έλεγχο του σχηματισμού NO_x. Ωστόσο, οποιοδήποτε όφελος μπορεί να εξανεμιστεί λόγω του δεσμευμένου στο καύσιμο αζώτου, το οποίο μπορεί να αυξήσει το σχηματισμό NO_x και τα επίπεδα N₂O ως αποτέλεσμα της καύσης.

Η καύση αμμωνίας σε κινητήρες εσωτερικής καύσης παράγει νερό, άζωτο, άκαυστη αμμωνία και NO_x. Παρόλο που η ίδια η ένωση μαζί με την καύση είναι απαλλαγμένη από άνθρακα, είναι απαραίτητο να γίνει σωστή διαχείριση των παραπροϊόντων της αμμωνίας και των NO_x, το οποίο μπορεί να χρειαστεί να υποβληθεί σε μια διαδικασία μετεπεξεργασίας. (ABS, 2020)

2.5 Βιοκαύσιμα

Οι επιπτώσεις της μείωσης της διαθεσιμότητας αργού πετρελαίου, της αυξημένης ζήτησης για την παγκόσμια εμπορική ναυτιλία και των αυστηρότερων κανονισμών για τα ναυτιλιακά καύσιμα έχουν πυροδοτήσει την αναζήτηση ανταγωνιστικά παραγόμενων εναλλακτικών ναυτιλιακών καυσίμων με χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο και χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα. Τα εναλλακτικά ορυκτά καύσιμα όπως το LNG και το LPG έχουν χαμηλές εκπομπές θείου και οξειδίων του αζώτου, αλλά έχουν περιορισμένη συμβολή στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τα βιοκαύσιμα, ωστόσο, έχουν πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και τη μείωση των εκπομπών σε όλο τον κύκλο ζωής τους.

Καθώς η βιομάζα θεωρείται ανανεώσιμος πόρος και περιέχει ελάχιστη ποσότητα θείου, τα βιοκαύσιμα έχουν τη δυνατότητα να αποτελέσουν σημαντικό παράγοντα του ενεργειακού μείγματος των ναυτιλιακών καυσίμων, μειώνοντας έτσι την εξάρτησή του τομέα από τα ορυκτά καύσιμα καθώς και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Τα βιοκαύσιμα προέρχονται από βιολογικά ανανεώσιμους πόρους και κυρίως, τα περισσότερα βιοκαύσιμα, προέρχονται από φυτικά σάκχαρα, έλαια και τερπένια. Η βιοαιθανόλη και το βιοDiesel είναι τα βιοκαύσιμα που παράγονται σε εμπορική κλίμακα παγκοσμίως, αν και έχουν σχεδόν αποκλειστικά χρησιμοποιηθεί από τον τομέα των οδικών μεταφορών.

Το πλεονέκτημα της παραγωγής ναυτιλιακών καυσίμων είναι ότι το καύσιμο μπορεί να είναι χαμηλότερης ποιότητας, να έχει υψηλότερο ιξώδες και να είναι λιγότερο εξευγενισμένο από τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται για αεροπορικές ή οδικές μεταφορές. Έτσι, τα ναυτιλιακά βιοκαύσιμα μπορούν να παράγονται με χαμηλότερο κόστος επεξεργασίας, εξαλείφοντας την ανάγκη για δευτερογενή διύλιση.

Οι καθιερωμένες επιχειρησιακές διαδικασίες του ναυτιλιακού τομέα καθιστούν την προσαρμογή των κινητήρων πλοίων για να λειτουργούν με νέα καύσιμα μια δαπανηρή διαδικασία. Είναι πιο οικονομικό να εκμεταλλευτεί κανείς την υπάρχουσα υποδομή - κινητήρες θαλάσσιων μεταφορών και αγωγούς μεταφοράς καυσίμων - ώστε να παράγει ένα καύσιμο συμβατό με αυτά που ήδη χρησιμοποιούνται. Αυτά τα καύσιμα ταιριάζουν με

την υπάρχουσα υποδομή και δεν απαιτούν μεγάλες επενδύσεις σε μηχανές πλοίων ή αλλαγές υποδομής.

Παρά το γεγονός ότι τα βιοκαύσιμα δεν χρησιμοποιούνται ακόμη σε μεγάλο βαθμό στο ναυτιλιακό τομέα, με βάση τις υπάρχουσες τεχνολογίες βιοκαυσίμων, τα ναυτιλιακά βιοκαύσιμα μπορούν να σχεδιαστούν και να παραχθούν ώστε να είναι τεχνικά συμβατά με τους κινητήρες των πλοίων. Επιπλέον, η πολύ υψηλή ευελιξία καυσίμου των ναυτιλιακών κινητήρων Diesel μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων διαδικασιών βιοκαυσίμων που συνδυάζουν διαφορετικές ποιότητες και τύπους. (Hsieh & Felby, 2017)

2.5.1 Τρέχοντα βιοκαύσιμα τύπου Diesel από βιομάζα

Τα φυτικά έλαια, είναι έλαια που εξάγονται από φυτά αποκλειστικά για χρήση ως καύσιμο. Αυτά τα καύσιμα δεν υποβάλλονται σε κανένα ενδιάμεσο στάδιο επεξεργασίας, αλλά εισάγονται σε κινητήρες Diesel απευθείας από την εξαγωγή. Μελέτες έχουν δείξει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αντικαταστήσουν το αργό πετρέλαιο σε κινητήρες χαμηλής ταχύτητας για φορτηγά πλοία αν και γενικά δεν θεωρούνται πρακτικά καύσιμα για μεγάλης κλίμακας ή μακροχρόνια χρήση. Λόγω του υψηλότερου ιξώδους και του υψηλού σημείου βρασμού τους, τα καύσιμα αυτά μειώνουν τη διάρκεια ζωής του κινητήρα λόγω της συσσώρευσης εναποθέσεων άνθρακα στο εσωτερικό του κινητήρα. Επομένως, δεν συνιστάται η χρήση φυτικών ελαίων ως ακατέργαστο μη επεξεργασμένο καύσιμο λόγω των κινδύνων βλάβης του κινητήρα.

Το επεξεργασμένο βιοDiesel παράγεται με μια διαδικασία που ονομάζεται μετεστεροποίηση, όπου διάφορα έλαια (τριγλυκερίδια) μετατρέπονται σε μεθυλεστέρες. Ως παραπροϊόντα παράγονται η γλυκερίνη και το νερό, τα οποία αργότερα απομακρύνονται. Το βιοDiesel, είναι επίσης κοινώς γνωστό ως μεθυλεστέρας λιπαρών οξέων (FAME), και λαμβάνεται από φυτικά έλαια ή ζωικά λίπη που έχουν μετεστεροποιηθεί με μεθανόλη ή αιθανόλη. Το μεθυλικό νάτριο χρησιμοποιείται συνήθως ως καταλύτης στη διαδικασία. Το FAME είναι πιο κατάλληλο καύσιμο από το καύσιμο από φυτικά έλαια για κινητήρες Diesel, με χαμηλότερο σημείο βρασμού και ιξώδες, που οδηγεί σε καλύτερη απόδοση του κινητήρα. Το βιοDiesel έχει υψηλότερο σημείο ανάφλεξης (149 °C) και υψηλότερο αριθμό κετανίου από το συμβατικό Diesel και

αποδομείται γρήγορα στο νερό. Το FAME, ωστόσο, έχει υψηλό σημείο νέφωσης που μπορεί να οδηγήσει σε απόφραξη του φίλτρου και κακή ροή καυσίμου σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από 32 °C.

Το βιοDiesel μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντικαταστήσει το ναυτιλιακό gasoil σε κινητήρες Diesel χαμηλής έως μέσης ταχύτητας, αν και χρησιμοποιείται πιο συχνά ως πρόσθετο καυσίμου και μπορεί να εγχυθεί απευθείας (drop-in) στις συμβατικές δεξαμενές καυσίμων. Το FAME ως καύσιμο έχει καλές ιδιότητες ανάφλεξης και λιπαντικότητας. Είναι θεωρητικά δυνατή η λειτουργία οχημάτων Diesel με 100% FAME, αλλά αυτό θα απαιτούσε προσαρμογές στους κινητήρες Diesel καθώς και έγκριση από τους κατασκευαστές κινητήρων. Ως εκ τούτου, μείγματα FAME, έως και 20%, με πετρέλαιο Diesel διανέμονται ευρέως στη λιανική αγορά καυσίμων, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κινητήρες Diesel με ελάχιστες ή καθόλου τροποποιήσεις.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του βιοDiesel είναι ότι μειώνει τον καπνό, την αιθάλη και την οσμή από τα καυσαέρια του κινητήρα, προστατεύοντας ταυτόχρονα από τη φθορά τις αντλίες καυσίμου και τα μπεκ ψεκασμού. Η χρήση του FAME σε κινητήρες Diesel έχει αποδειχθεί ότι μειώνει τα οξείδια του θείου, το μονοξείδιο του άνθρακα και τα άκαυστα σωματίδια.

Το κύριο τεχνικό μειονέκτημα του βιοDiesel σε σύγκριση με το πετρέλαιο είναι η χαμηλότερη περιεκτικότητά του σε ενεργειακό περιεχόμενο, καθώς το βιοDiesel έχει υψηλότερη περιεκτικότητα σε οξυγόνο σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα υδρογονανθράκων. Η υψηλότερη περιεκτικότητά του σε οξυγόνο οδηγεί επίσης σε χαμηλότερη σταθερότητα, καθώς είναι πιο επιρρεπές στην αποικοδόμηση με την πάροδο του χρόνου και σχηματίζει υπεροξείδια, οξέα και άλλες αδιάλυτες ενώσεις. Για να αποφευχθεί η πρόωμη αποικοδόμηση, μπορούν να προστεθούν αντιοξειδωτικά στο μείγμα. Μια άλλη ανησυχία αναφορικά με τη χρήση του βιοDiesel είναι η επιμόλυνση του καυσίμου με νερό που οδηγεί σε μειωμένη απόδοση, αυξημένη μικροβιακή ανάπτυξη και επιταχυνόμενη πήξη του καυσίμου σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Το βιοDiesel που παράγεται εμπορικά προέρχεται από μια ποικιλία πρώτων υλών φυτικής και ζωικής προέλευσης. Οι φυτικές πρώτες ύλες περιλαμβάνουν ελαιοκράμβη (πιο κοινή στην ΕΕ), σόγια (πιο κοινή στις ΗΠΑ και Νότια Αμερική), φοίνικα (κοινός στη Νοτιοανατολική Ασία) και καλαμπόκι. Οι πρώτες ύλες ζωικής προέλευσης περιλαμβάνουν

το λίπος, τα απορρίμματα των πουλερικών και άλλα ζωικά λίπη. Το χρησιμοποιημένο μαγειρικό λάδι έχει επίσης χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοDiesel. Στον

Πίνακα 2.4 εμφανίζονται οι σημαντικότερες ενεργειακές καλλιέργειες και η απόδοση τους σε βιοDiesel.

| Ενεργειακή καλλιέργεια | Απόδοση καυσίμου (L/ha) |
|------------------------|-------------------------|
| Φοίνικας | 7,925 – 13,000 |
| Καρύδα | 2,700 |
| Jatropha | 643 – 3,800 |
| Canola | 660 - 1850 |
| Ηλιόσπορος | 647 - 1339 |
| Σόγια | 267 - 550 |
| Άλγη | 3,800 – 11,000 |

Πίνακας 2.4 Απόδοση ανά έτος κοινών καλλιεργειών για βιοDiesel (Wikipedia, 2006)

2.5.2 Συμβατά βιοκαύσιμα

Οι κατασκευαστές κινητήρων υπολογίζουν ότι το κόστος προσαρμογής ενός νέου τύπου ναυτιλιακού κινητήρα για ένα νέο καύσιμο είναι ιδιαίτερα υψηλό. Ωστόσο και οι πλοιοκτήτες δεν θα στραφούν σε εναλλακτικά καύσιμα εάν η παροχή καυσίμου δεν είναι εγγυημένη για τη διάρκεια ζωής του κινητήρα του πλοίου. Έτσι, εάν υπήρχε η δυνατότητα τα νέα καύσιμα να γίνουν λειτουργικά ισοδύναμα με τα υπάρχοντα, θα ήταν πλήρως συμβατά με την υπάρχουσα υποδομή καυσίμων χωρίς την ανάγκη εκτεταμένων επενδύσεων σε τροποποιήσεις της υποδομής.

Τα συμβατά βιοκαύσιμα ορίζονται ως υγροί βιο-υδρογονάνθρακες που είναι λειτουργικά ισοδύναμοι με τα καύσιμα που προέρχονται από το πετρέλαιο και είναι πλήρως συμβατοί με την υπάρχουσα δομή και το δίκτυο διακίνησης πετρελαίου. Εξ ορισμού, πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- αναμειξιμότητα με καύσιμα που προέρχονται από το πετρέλαιο
- συμβατότητα με τις προδιαγραφές απόδοσης,
- καλή ικανότητα αποθήκευσης,
- δυνατότητα μεταφοράς με τις υπάρχουσες δομές logistics και
- χρηστικότητα σε υπάρχοντες κινητήρες.

Επιπλέον, απαιτείται να είναι συμβατά με συστήματα ψεκασμού καυσίμου που υπάρχουν ήδη.

Τα βιοκαύσιμα αποτελούνται από ένα μείγμα πολλών διαφορετικών υδρογονανθράκων και έχουν παρόμοιες ιδιότητες καύσης με τα συμβατικά καύσιμα, προκειμένου να είναι συμβατά με την υπάρχουσα υποδομή. Αυτό σημαίνει ότι το καύσιμο πρέπει να αποτελείται κυρίως από άνθρακα και υδρογόνο κατά μάζα, με μικρά ίχνη αζώτου, οξυγόνου, θείου και μετάλλων. Η πρόκληση της παραγωγής καυσίμων από βιομάζα είναι ότι η υψηλή περιεκτικότητα σε Ο στη βιομάζα δεν είναι κατάλληλη για άμεση μετατροπή, και επομένως απαιτεί πρόσθετα στάδια επεξεργασίας, όπως η αποοξυγόνωση, για να επιτευχθεί υψηλός λόγος Η:С. Μια άλλη προσέγγιση θα ήταν η εντατική υδρογονοκατεργασία, δηλαδή η προσθήκη H_2 , η οποία ωστόσο είναι μια δαπανηρή διεργασία και απαιτεί περαιτέρω διύλιση. Το επιθυμητό τελικό αποτέλεσμα είναι ένας υδρογονάνθρακας που προέρχεται από βιομάζα που έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε οξυγόνο, χαμηλή υδατοδιαλυτότητα και υψηλό βαθμό κορεσμένων δεσμών άνθρακα.

Το πιο κοινό βιοκαύσιμο, η βιοιθανόλη, συνήθως αναμιγνύεται με βενζίνη για χρήση σε βενζινοκινητήρες και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για πετρελαιοκινητήρες πλοίων. Το συμβατικό βιοDiesel, που αναφέρεται επίσης ως FAME, θα λειτουργούσε ως καύσιμο σε έναν κινητήρα Diesel πλοίων, αλλά δεν είναι πλήρως συμβατό ως καύσιμο για άλλους τύπους κινητήρων Diesel. Για την παραγωγή καυσίμου Diesel προερχόμενο από βιομάζα και πλήρως συμβατό με κινητήρες Diesel, οι προμηθευτές καυσίμων παράγουν Diesel που προέρχεται από υδρογόνωση, γνωστό και ως ανανεώσιμο Diesel. Για να επιτευχθεί η συμβατότητα με την υπάρχουσα υποδομή

πετρελαίου, τα ζωικά λίπη και τα φυτικά έλαια πρέπει να υποστούν ένα βήμα υδρογονοεπεξεργασίας για τη μετατροπή τους σε βιοκαύσιμα αποξυγονωμένου υδρογονάνθρακα (υδροκατεργασμένοι εστέρες και λιπαρά οξέα HEFA). Είναι απαλλαγμένο από εστερικές ενώσεις και έχει χαμηλότερο κόστος παραγωγής καθώς χρησιμοποιεί την υπάρχουσα τεχνολογία διεργασίας υδροεπεξεργασίας που λειτουργεί ήδη στα διυλιστήρια πετρελαίου.

Ωστόσο, για να αυξήσει περαιτέρω τον όγκο παραγωγής σε κλίμακα κατάλληλη για τη ναυτιλία, η βιομηχανία θα πρέπει να εισάγει λιγνοκυτταρινικές πρώτες ύλες στο μείγμα παραγωγής καυσίμων για να διατηρήσει βιώσιμες τις πρώτες ύλες και το κόστος παραγωγής. Ωστόσο, με περαιτέρω δοκιμές και ανάπτυξη αυτών των καυσίμων, τα βιοκαύσιμα είναι μια εναλλακτική λύση στα συμβατικά ναυτιλιακά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα. (Hsieh & Felby, 2017)

2.5.3 Προηγμένες τεχνολογίες παραγωγής βιοκαυσίμων

- Ελαιοχημικά καύσιμα

Τα υδροεπεξεργασμένα φυτικά έλαια (HVO) είναι επίσης γνωστά ως υδροκατεργασμένοι εστέρες και λιπαρά οξέα (HEFA), πράσινο Diesel ή υδροκατεργασμένα ανανεώσιμα έλαια (HRO). Αποτελούνται από φυτικά έλαια ή ζωικά λίπη που έχουν υποστεί υδροεπεξεργασία και διύλιση, συνήθως παρουσία καταλύτη. Η υδροεπεξεργασία περιλαμβάνει την εισαγωγή υδρογόνου στην πρώτη ύλη σε μια διαδικασία δύο σταδίων: η πρώτη ύλη αρχικά αποοξυγονώνεται και οι διπλοί δεσμοί γίνονται κορεσμένοι για να σχηματίσουν αλκάνια. Στο δεύτερο στάδιο, τα αλκάνια υφίστανται ισομερισμό και πυρόλυση. Κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου, το μήκος της αλκυλικής αλυσίδας μειώνεται και η διακλάδωση των υδρογονανθράκων αυξάνεται - μια διαδικασία που παράγει κυρίως κλάσματα Diesel. Το καύσιμο HVO μπορεί να παραχθεί σε διωλιστήρια πετρελαίου, τα οποία είναι ήδη εξοπλισμένα με εγκαταστάσεις υδροεπεξεργασίας. Η διαδικασία παραγωγής είναι συνήθως πιο δαπανηρή από ό,τι για το Diesel FAME, ωστόσο, η υδροεπεξεργασία των φυτικών ελαίων οδηγεί σε παραγωγή καυσίμου που μπορεί να εισαχθεί απευθείας στις εγκαταστάσεις διανομής και ανεφοδιασμού καθώς και σε υπάρχοντες κινητήρες Diesel χωρίς περαιτέρω τροποποίηση.

Η συζήτηση που αφορά την παραγωγή καυσίμων εις βάρος της παραγωγής τροφίμων επιτάχυνε περαιτέρω την παραγωγή βιοκαυσίμων από φύκια, καθώς τα φωτοσυνθετικά φύκια μπορούν να αναπτυχθούν χρησιμοποιώντας αλμυρό νερό και λύματα, χωρίς να απαιτούν καλλιεργήσιμη γη, και με υψηλότερες αποδόσεις από τις ενεργειακές καλλιέργειες. Τα καύσιμα που παράγονται από βιομάζα φυκιών μπορεί να έχουν υψηλό σημείο ανάφλεξης και είναι βιοδιασπώμενα και συμβατά με το πετρέλαιο βιοDiesel. Οι πρώτες ύλες από φύκη έχουν τη δυνατότητα να μετατραπούν σε καύσιμα, επειδή τα στελέχη τους έχουν πολύ υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης, γεγονός που μεταφράζεται σε υψηλή απόδοση βιομάζας ανά εκτάριο. Όταν τα έλαια από φύκη υποβάλλονται σε υδρογονοκατεργασία, μπορούν επίσης να λειτουργήσουν ως καύσιμο χωρίς παρουσία θείου.

Το κύριο μειονέκτημα της παραγωγής βιοκαυσίμων από φύκια είναι το κόστος επεξεργασίας. Μέχρι σήμερα, δεν υπάρχει ακόμη κανένα εμπορικό καύσιμο φυκιών διαθέσιμο, λόγω του υψηλού κεφαλαίου και του κόστους λειτουργίας του. Ως αποτέλεσμα, η βιομάζα από φύκι έχει πολύ υψηλότερο κόστος ανά μονάδα μάζας από άλλες καλλιέργειες βιοκαυσίμων 2ης γενιάς. Οι εταιρείες βιοκαυσίμων φυκιών εξακολουθούν να βρίσκονται στη φάση ανάπτυξης, συχνά με την υποστήριξη κυβερνητικών φορέων χρηματοδότησης ή/και πανεπιστημίων. Οι εμπορικές εγκαταστάσεις φυκιών επικεντρώνονται στην παραγωγή θρεπτικών προσθέτων, λιπιδίων και πρωτεϊνών.

- Αναβάθμιση παραπροϊόντων πολτοποίησης

Η βιομηχανία χαρτοπολτού χρησιμοποιεί λιγνοκυτταρινικό ινώδες υλικό για την παραγωγή πολτού. Οι πρώτες ύλες για την παραγωγή χαρτοπολτού περιλαμβάνουν ξύλο, φυτικές ίνες ή απορρίμματα χαρτιού. Οι ίνες ξύλου για πολτοποίηση είναι ένα μείγμα από κορμούς, ροκανίδια και ανακυκλωμένο χαρτί. Το ξύλο και τα υπόλοιπα φυτικά υλικά που χρησιμοποιούνται για την χημική κατασκευή του πολτού αποτελούνται από τρία κύρια βιοπολυμερή: κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη. Οι διεργασίες χημικής πολτοποίησης αποικοδομούν τη λιγνίνη και την ημικυτταρίνη σε μικρότερα υδατοδιαλυτά συστατικά ενώ αφήνουν ανέπαφες τις επιθυμητές ίνες της κυτταρίνης.

Η εξαγόμενη κυτταρίνη που λαμβάνεται από την πολτοποίηση υποβάλλεται σε περαιτέρω επεξεργασία για την παραγωγή χαρτιού, ενώ η λιγνίνη και η ημικυτταρίνη χρησιμοποιούνται ως καύσιμο καίγονται για να παρέχουν ενέργεια στις διεργασίες επεξεργασίας. Οι ερευνητικές προσπάθειες τις τελευταίες δεκαετίες επικεντρώνονται στη δημιουργία προϊόντων υψηλότερης αξίας από τη ροή αποβλήτων λιγνίνης. Υπάρχει η δυνατότητα μετατροπής της υπολειμματικής λιγνίνης από τη διαδικασία πολτοποίησης σε καύσιμο χωρίς θείο.

Η λιγνίνη, αφού διαχωριστεί μετά τη διαδικασία πολτοποίησης, μπορεί να μετατραπεί σε ενδιάμεσο καύσιμο μέσω θερμικής μετατροπής χρησιμοποιώντας καταλύτες. Το ενδιάμεσο καύσιμο, μπορεί να υποστεί περαιτέρω επεξεργασία σε συστατικά βενζίνης και/ή Diesel. Το ενδιάμεσο μπορεί επίσης να αεριοποιηθεί απευθείας και να παράγει αέριο σύνθεσης και στη συνέχεια βιομεθανόλη ή υδρογόνο μέσω αναμόρφωσης.

Εκτός από τη λιγνίνη και την ημικυτταρίνη, ένα άλλο απόβλητο προϊόν από την παραγωγή χαρτοπολτού είναι το ταλλέλαιο. Το ταλλέλαιο είναι ένα σκούρο παχύρρευστο υγρό που παράγεται ως παραπροϊόν κατά την πολτοποίηση μετά την επεξεργασία. Οι κύριες πρώτες ύλες για την εξόρυξη ταλλέλαιου προέρχονται σήμερα από τα σκανδιναβικά δάση π.χ. πεύκο, έλατο και σημύδα. Οι αποδόσεις για το ταλλέλαιο κυμαίνονται από 30-50 kg ανά τόνο χαρτοπολτού και ο όγκος παραγωγής περιορίζεται από τη βιομηχανία χαρτιού. Το ταλλέλαιο έχει χρησιμοποιηθεί ιστορικά ως συστατικό υγρών γεώτρησης, κολλών και καουτσούκ. Έχουν γίνει προσπάθειες να μετατραπεί το ταλλέλαιο σε βιοDiesel για ανάμειξη με καύσιμο Diesel, αν και η μεγαλύτερη πρόκληση είναι η προμήθεια της πρώτης ύλης σε μεγάλους όγκους.

Η υδρογόνωση του ταλλέλαιου δημιουργεί ένα καύσιμο που μοιάζει με HVO, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο Diesel ή να αναμειχθεί με συμβατικά καύσιμα. Η διεργασία παραγωγής είναι παρόμοια με εκείνη για την παραγωγή HVO και λαμβάνει χώρα σε παραδοσιακά διυλιστήρια με χημική κατάλυση. (Hsieh & Felby, 2017)

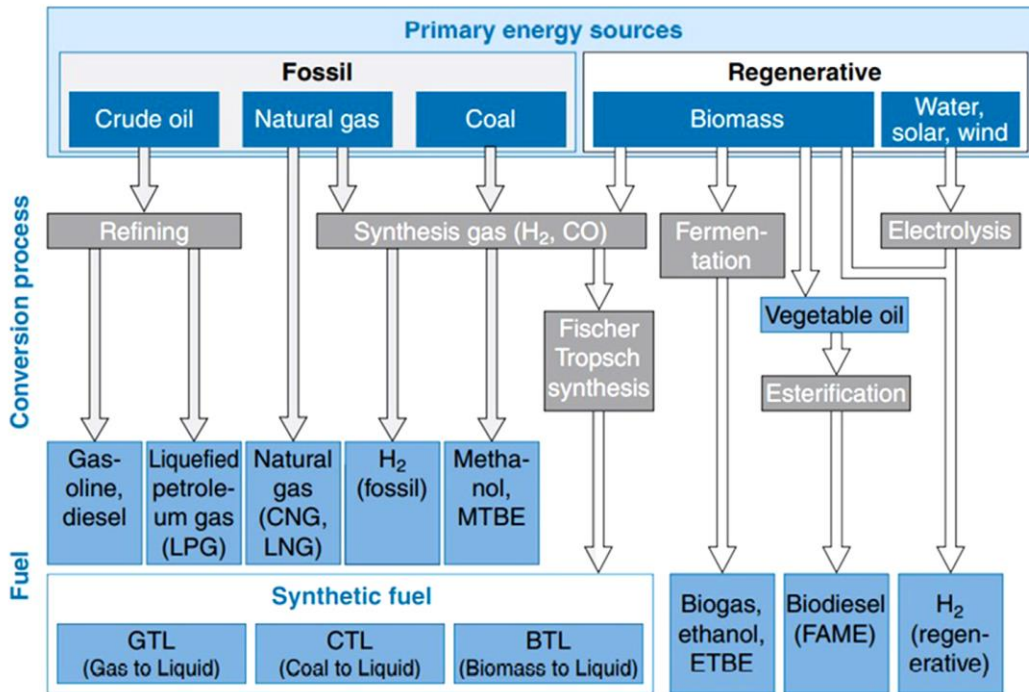
Κεφάλαιο 3: Ανάλυση προηγμένων συστημάτων πρόωσης

3.1 Υβριδικά συστήματα και συστήματα διπλού καυσίμου

3.1.1 Συστήματα πρόωσης διπλού καυσίμου (Dual-fuel propulsion)

Οι κινητήρες Diesel χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της υψηλής απόδοσης καύσης, της αξιοπιστίας, της προσαρμοστικότητας και της οικονομικής τους απόδοσης. Ωστόσο, οι κινητήρες Diesel είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που συμβάλλουν στην περιβαλλοντική ρύπανση. Οι κύριοι επιβλαβείς ρύποι από τους κινητήρες Diesel είναι τα NO_x και τα μικροσωματίδια. Η εκπομπή NO_x είναι μία από τις κύριες αιτίες της φωτοχημικής αιθαλομίχλης και της όξινης βροχής. Τα μικροσωματίδια από τους κινητήρες Diesel αποτελούνται από διάφορους τύπους χημικών συστατικών όπως άνθρακας, ανόργανα ιόντα και ιχνοστοιχεία. Αυτά τα σωματίδια έχουν εξαιρετικά επιβλαβείς επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον - πολυάριθμες μελέτες έχουν αποδείξει ότι αυτά τα σωματίδια προκαλούν αναπνευστικά και καρδιαγγειακά προβλήματα. Ως εκ τούτου, οι κανονισμοί εκπομπών γίνονται όλο και πιο αυστηροί για τη μείωση αυτών των επιβλαβών εκπομπών.

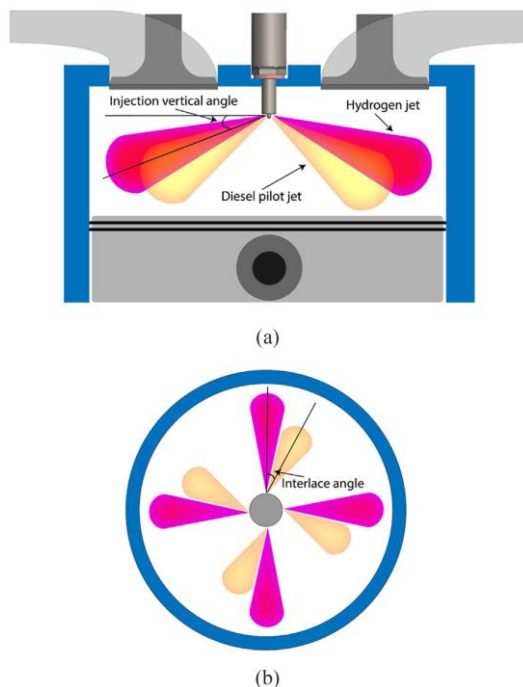
Ως εκ τούτου, η χρήση εναλλακτικών καυσίμων σε κινητήρες Diesel έχει αναδειχθεί ως μια ιδιαίτερα ελκυστική πρόταση. Στο Σχήμα 3.1 περιγράφεται η διαδικασία μετατροπής των πηγών πρωτογενούς ενέργειας: Αυτό το σχήμα δείχνει ότι τα ανανεώσιμα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στα συστήματα διπλού καυσίμου ενός κινητήρα Diesel περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων την αιθανόλη, τα βιοκαύσιμα, το μεθυλεστέρα λιπαρών οξέων (FAME) και το υδρογόνο. Αυτά τα καύσιμα είναι αποτελεσματικές εναλλακτικές λύσεις για τη μείωση των εκπομπών NO_x, των αερίων θερμοκηπίου και των μικροσωματιδίων. Σε αρκετές μελέτες, οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι και το φυσικό αέριο θα μπορούσε να αποτελέσει βασική εναλλακτική λύση για τη μείωση του κόστους λειτουργίας και των επιβλαβών εκπομπών από κινητήρες Diesel. (Bae & Kim, 2016)



Σχήμα 3.1 Κύριες διαδικασίες μετατροπής πηγών ενέργειας (Reif, 2015)

Μια σειρά από μελέτες (Yip, Srna, Chun, & Chun Yin Yuen, 2019) έχουν χρησιμοποιήσει το Diesel ως δευτερεύον καύσιμο και αρκετά εναλλακτικά καύσιμα, όπως το υδρογόνο, το LNG, το CNG και το LPG ως το κύριο καύσιμο στους κινητήρες εσωτερικής καύσης διπλού καυσίμου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Σε σύγκριση με τον συμβατικό κινητήρα Diesel, ο κινητήρας διπλού καυσίμου εκπέμπει σημαντικά χαμηλότερα NO_x και μικροσωματίδια, ωστόσο οι εκπομπές άκαυτων υδρογονανθράκων και CO ήταν ελαφρώς υψηλότερες. Αυτό βοηθά στη βελτίωση των εκπομπών CO₂ και NO_x από κινητήρες εσωτερικής καύσης χωρίς να θυσιάζεται η απόδοση μετατροπής καυσίμου. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια αντιστάθμιση μεταξύ των εκπομπών NO_x και των υδρογονανθράκων λόγω της καύσης βαρύτερων κλασμάτων υδρογονανθράκων και χαμηλότερων αναλογιών άνθρακα προς υδρογόνο από τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Έτσι, τόσο τα μικροσωματίδια όσο και τα NO_x θα μπορούσαν



Σχήμα 3.2 (a) Σχηματική αναπαράσταση της υποβοηθούμενης ανάφλεξης του υδρογόνου άμεσου ψεκασμού. (b) Σχηματική απεικόνιση της διαμόρφωσης του ομόκεντρου πίδακα εγχυτήρων DI διπλού καυσίμου στο άνω επίπεδο. (Yip, Srna, Chun, & Chun Yin Yuen, 2019)

να ελέγχονται με τη χρήση συσκευών μετεπεξεργασίας καυσαερίων για την τήρηση των αυστηρών κανονισμών εκπομπών σε όλο τον κόσμο. Ένα σημαντικό πρόβλημα με τα καύσιμα LNG και CNG είναι ο ειδικός όγκος τους, ο οποίος είναι πολύ χαμηλός σε συνθήκες περιβάλλοντος. Αυτό επηρεάζει το σύστημα ψεκασμού καυσίμου με αποτέλεσμα, για να εγχυθεί η επιθυμητή μάζα καυσίμου, να απαιτείται πολύ μεγαλύτερη περιοχή διατομής του μπεκ ψεκασμού σε σχέση με ένα μπεκ ψεκασμού Diesel.

Επιπλέον, ο καθυστερημένος χρονισμός έγχυσης παρέχει ανεπαρκή ομογενοποίηση του μίγματος, οδηγώντας σε ατελή καύση και υψηλότερες εκπομπές. Πολλαπλοί ψεκασμοί δυνητικά παράγουν ένα ομοιογενές μείγμα καυσίμου-αέρα, γεγονός που εξασφαλίζει την ανάφλεξη με το πιλοτικό ψεκασμό κοντά στο χρονισμό ανάφλεξης. Το LNG, το CNG και το LPG έχουν το πλεονέκτημα ότι εκπέμπουν πολύ χαμηλότερο CO₂ ενώ παράγουν την ίδια ισχύ, αν και με παρόμοια απόδοση μετατροπής καυσίμου. Επιπλέον, αυτά τα καύσιμα υπάρχουν ως αέρια υπό κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και εξατμίζονται ταχύτερα από το πετρέλαιο Diesel, γεγονός που μειώνει τις εκπομπές μικροσωματιδίων. Δεδομένου ότι αυτά τα καύσιμα έχουν υψηλούς αριθμούς οκτανίου και χαμηλούς αριθμούς κετανίου,

λειτουργούν καλά ως διπλά καύσιμα σε έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης. Κατά τη διάρκεια της καύσης, το πετρέλαιο Diesel εγχέεται για να ξεκινήσει η ανάφλεξη και στην πρώτη φάση καύσης, καίγεται με ταχεία συσσώρευση πίεσης. Μετά από αυτό, το LNG/CNG/LPG εγχέεται στα καυσαέρια του Diesel και καίγεται στη δεύτερη φάση καύσης. Η διάρκεια της καύσης στη δεύτερη φάση ελέγχεται ουσιαστικά από τον ρυθμό έγχυσης αυτών των αερίων καυσίμων.

Η βελτιωμένη τεχνολογία διπλού καυσίμου έχει πρόσφατα αποδειχθεί αποτελεσματική για εφαρμογές υψηλής ροπής/ιπποδύναμης που χρησιμοποιούν συστήματα άμεσου ψεκασμού υψηλής πίεσης (HPDI) για Diesel και CNG/LNG. Κατά το αρχικό στάδιο της ανάπτυξης της τεχνολογίας άμεσου ψεκασμού υψηλής πίεσης, η κύρια έγχυση καυσίμου φυσικού αερίου ακολουθήθηκε από την έγχυση Diesel. (Yip, Srna, Chun, & Chun Yin Yuen, 2019)

- Χαρακτηριστικά απόδοσης και καύσης

Η έρευνα για τα εναλλακτικά καύσιμα επικεντρώνεται στο υδρογόνο/βιοαέριο/βιοDiesel και στο Diesel για χρήση στα συστήματα διπλού καυσίμου σε κινητήρες εσωτερικής καύσης για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών απόδοσης του κινητήρα, όπως η ειδική κατανάλωση καυσίμου η θερμική απόδοση.

Έχει μελετηθεί η επίδραση του υδρογόνου στην απόδοση του κινητήρα εσωτερικής καύσης, η οποία εξαρτάται από το συνδυασμό καυσίμων και τα διαφορετικά φορτία. Έχει αποδειχθεί ότι η ύπαρξη υδρογόνου στο μίγμα καύσης αυξάνει τη θερμική απόδοση και οδηγεί σε μείωση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου.

Η ειδική κατανάλωση ενέργειας αντιπροσωπεύει την ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή ισχύος 1 kW. Πολυάριθμες μελέτες έχουν δείξει ότι η ειδική κατανάλωση ενέργειας είναι μια πολύ αποτελεσματική παράμετρος για τη σύγκριση της απόδοσης ενός κινητήρα. Για συστήματα διπλού καυσίμου Diesel - υδρογόνου, η ειδική κατανάλωση ενέργειας στη λειτουργία διπλού καυσίμου είναι υψηλότερη από τη συμβατική λειτουργία εσωτερικής καύσης με καύσιμο Diesel υπό συγκεκριμένο φορτίο κινητήρα. Με την αύξηση της προσθήκης υδρογόνου, η ειδική κατανάλωση ενέργειας της λειτουργίας διπλού καυσίμου είναι πάντα υψηλότερη από τη λειτουργία καυσίμου Diesel σε όλες τις δοκιμασμένες συνθήκες φορτίου κινητήρα. Γενικά, η απόδοση καυσίμου του

κινητήρα Diesel αυξήθηκε με την αύξηση της προσθήκης υδρογόνου σε όλες τις συνθήκες φορτίου κινητήρα.

Επίσης η υψηλότερη ποσότητα αερίου καυσίμου οδηγεί σε αύξηση της πίεσης στον κινητήρα. Η αύξηση της πίεσης στον κινητήρα διπλού καυσίμου είναι υψηλότερη από τον συμβατικό κινητήρα Diesel. Μια αύξηση στην αναλογία αερίου - καυσίμου έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη καθυστέρηση ανάφλεξης λόγω χαμηλότερου αριθμού κετανίου των μιγμάτων, η οποία αυξάνει τη χημική καθυστέρηση, τη φάση προαναμεμιγμένης καύσης και την πίεση. (Yip, Srna, Chun, & Chun Yin Yuen, 2019)

- Χαρακτηριστικά εκπομπών

Οι επιβλαβείς εκπομπές εκλύονται από έναν κινητήρα που λειτουργεί με συμβατικά καύσιμα λόγω ατελούς καύσης. Τα εναλλακτικά καύσιμα σε συνδυασμό με τα συμβατικά, αναμένεται να γίνουν δημοφιλή λόγω των χαμηλότερων εκπομπών. Στη λειτουργία διπλού καυσίμου, οι εκπομπές HC, CO, NO_x, μικροσωματιδίων, αιθάλης και καπνού επηρεάζονται από τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, όπως η ποσότητα Diesel, ο χρονισμός ψεκασμού, η γωνία ψεκασμού και το φορτίο του κινητήρα. Μελέτες για τα συστήματα διπλού καυσίμου έχουν δείξει ότι μπορούν να μειώσουν σημαντικά τα NO_x, τα μικροσωματίδια και τον καπνό. Ωστόσο, οι εκπομπές υδρογονανθράκων, CO και αιθάλης μπορεί να αυξηθούν υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα.

Οι εκπομπές ολικών υδρογονανθράκων (THC) εξαρτώνται από το πόσο αποτελεσματική είναι η καύση. Έχει αναλυθεί η επίδραση του φορτίου του κινητήρα και του χρονισμού έγχυσης στις εκπομπές υδρογονανθράκων σε κινητήρα διπλού καυσίμου φυσικού αερίου (99,5% καθαρό μεθάνιο)-Diesel. Αποδείχθηκε ότι οι εκπομπές υδρογονανθράκων αυξήθηκαν δραστικά με τη μείωση του φορτίου και το υψηλότερο κλάσμα μάζας φυσικού αερίου. Επομένως, μπορεί να υποθεθεί ότι η αναλογία περίσσειας αέρα μειώθηκε με την αύξηση του κλάσματος μάζας φυσικού αερίου, γεγονός που αύξησε την απόδοση καύσης του μείγματος φυσικού αερίου-Diesel. Η εκπομπή CO μειώθηκε σταθερά με την αύξηση της γωνίας ψεκασμού. Ο λόγος ήταν η πλήρης καύση του μείγματος στην κορυφή του κυλίνδρου, που προκλήθηκε από τα σταγονίδια καυσίμου Diesel που εισέρχονται σε αυτή τη ζώνη. Ο κινητήρας παρουσίασε επίσης μια απότομη μείωση των εκπομπών NO_x λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών στον κύλινδρο και της

απόδοσης καύσης, που προκαλούνται από την καταστολή της αυτόματης ανάφλεξης του Diesel στον κινητήρα που τροφοδοτείται με φυσικό αέριο.

Ως μικροσωματίδια (PM) ορίζονται οι ενώσεις σωματιδιακής φάσης που εκπέμπονται στα καυσαέρια του κινητήρα Diesel. Οι εκπομπές μικροσωματιδίων είναι ένα μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα της τρέχουσας γενιάς συστημάτων μεταφοράς με κινητήρα εσωτερικής καύσης. Οι εκπομπές μικροσωματιδίων παραμένουν ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη και την εξέλιξη του κινητήρα εσωτερικής καύσης. Η επίδραση του λόγου καύσης και των διαφορετικών τρόπων έγχυσης έχουν διερευνηθεί σε κινητήρες Diesel μεθανόλης διπλού καυσίμου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι εκπομπές μικροσωματιδίων από το σύστημα διπλής έγχυσης ήταν υψηλότερες από τη λειτουργία απλής έγχυσης επειδή η μέγιστη θερμοκρασία στον κύλινδρο ήταν σχετικά χαμηλότερη, γεγονός που επηρέασε αρνητικά την οξείδωση των μικροσωματιδίων στον θάλαμο καύσης. (Yip, Srna, Chun, & Chun Yin Yuen, 2019)

3.1.2 Υβριδικά συστήματα πρόωσης (Hybrid propulsion)

Τα νέα ηλεκτρικά και υβριδικά συστήματα πρόωσης, έχουν γίνει εφικτά από τα καινοτόμα και υψηλών επιδόσεων εξαρτήματα, όπως οι μπαταρίες, οι κυψέλες καυσίμου, και οι υπερπυκνωτές και αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για τη μείωση των ρύπων και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ωστόσο, η ενσωμάτωση αυτών των νέων συστημάτων πρόωσης στα σκάφη που λειτουργούν με κινητήρες εσωτερικής καύσης είναι μια πραγματική τεχνική πρόκληση. Οι προδιαγραφές των πλοίων στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας για επιβάτες ή φορτίο και στην ελαχιστοποίηση του όγκου που αφιερώνεται στην αποθήκευση ενέργειας και στα συστήματα πρόωσης. Επίσης, οι διαθέσιμοι χρόνοι για τη φόρτιση των ενεργειακών συστημάτων είναι συχνά περιορισμένοι. (Menana, Billard, Bennabi, & Charpentier, 2016)

- Πλεονεκτήματα συστημάτων υβριδικής πρόωσης

Τα υβριδικά συστήματα πρόωσης (Hybrid Propulsion Systems - HPS) παρουσιάζουν ενδιαφέρον όταν υπάρχει μεγάλη διακύμανση στη ζήτηση ισχύος κατά τη λειτουργία. Οι κανόνες σχεδιασμού αυτού του τύπου συστημάτων μπορεί να διαφέρουν σημαντικά για τους διαφορετικούς τύπους σκαφών, κυρίως λόγω των διαφορετικών απαιτήσεων λειτουργίας. Ανάμεσα σε όλες τις διαθέσιμες επιλογές, τα υβριδικά συστήματα πρόωσης φαίνεται να είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για το σχεδιασμό πλοίων υψηλής απόδοσης και φιλικών προς το περιβάλλον. Τα βασικότερα πλεονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι:

- Τα υβριδικά συστήματα παρέχουν καλύτερη ενεργειακή απόδοση και σημαντική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και ρύπων από τα κλασικά συστήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης,
- Τα υβριδικά συστήματα είναι αρθρωτά και προσφέρουν πλεόνασμα ισχύος,
- Η χρήση συστημάτων ηλεκτρικής πρόωσης επιτρέπουν τη βελτίωση της ικανότητας ελιγμών και παρέχουν σημαντική μείωση του θορύβου και των κραδασμών,
- Τα συστήματα ηλεκτρικής πρόωσης προσφέρουν μεγαλύτερο βαθμό ελευθερίας όσον αφορά τη ναυπηγική αρχιτεκτονική και επιτρέπουν την απελευθέρωση του διαθέσιμου χώρου στο πλοίο,
- Τα υβριδικά συστήματα επιτρέπουν τη μείωση του επιπέδου δόνησης που μεταδίδεται στη δομή του πλοίου,
- Τα υβριδικά συστήματα οδηγούν σε μείωση της συντήρησης στους κινητήρες εσωτερικής καύσης, επειδή χρησιμοποιούνται πάντα με τον βέλτιστο τρόπο.

Ωστόσο, δεν είναι όλες οι τεχνολογίες ώριμες και οι επιδόσεις διαχείρισης κόστους και ενέργειας δεν είναι ακόμη ικανοποιητικές. (Menana, Billard, Bennabi, & Charpentier, 2016)

- Αρχιτεκτονικές υβριδικών συστημάτων

Τα υβριδικά συστήματα πρόωσης βασίζονται στο διαχωρισμό ή την ταυτόχρονη χρήση πολλών διαφορετικών πηγών ενέργειας. Η επιλογή διαφορετικών πηγών και ο συνδυασμός τους, έχει σχεδιαστεί για να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις ισχύος και ενέργειας του πλοίου που περιλαμβάνουν τις ανάγκες χαμηλής και υψηλής ισχύος και τις ανάγκες ευελιξίας στις αλλαγές του ρυθμού.

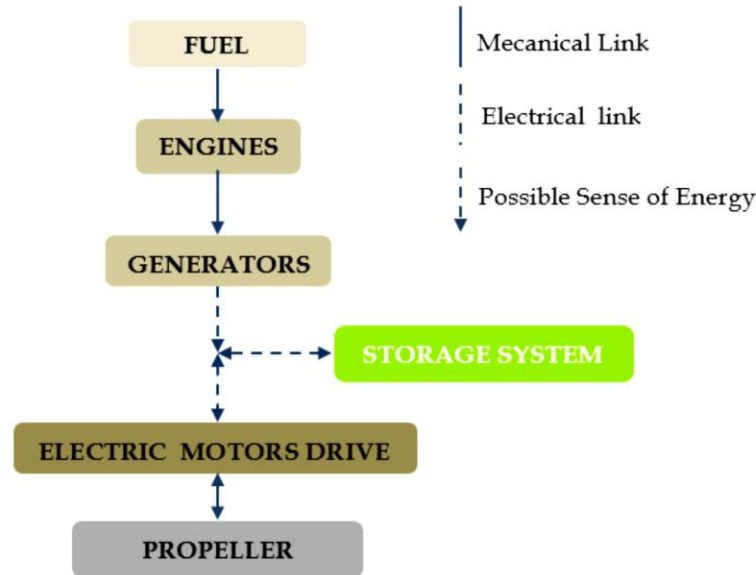
Η χρήση ενός υβριδικού συστήματος είναι μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου, ειδικά για τα σκάφη που απαιτούν υψηλό βαθμό ευελιξίας. Υπάρχουν τρεις κύριες αρχιτεκτονικές για τα υβριδικά συστήματα πρόωσης. (Menana, Billard, Bennabi, & Charpentier, 2016)

- ο Υβριδικά συστήματα σε σειρά

Σε αυτόν τον τύπο υβριδικών συστημάτων, δύο είδη ενεργειακών συστημάτων - κινητήρες εσωτερικής καύσης και ηλεκτρικά συστήματα - χρησιμοποιούνται σε σειρά. Η πρόωση πραγματοποιείται με ηλεκτρική κίνηση μεταβλητής ταχύτητας (κινητήρας πρόωσης και μετατροπέας ισχύος). Η ηλεκτρική ισχύς του κινητήρα πρόωσης γενικά παρέχεται από ένα σύνολο γεννητριών που κινούνται από κινητήρες εσωτερικής καύσης. Μια άλλη επιλογή είναι η χρήση κυψελών καυσίμου για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας ή συνδυασμός κυψελών καυσίμου και γεννητριών που κινούνται από κινητήρα εσωτερικής καύσης. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (ESS), όπως μπαταρίες και υπερπυκνωτές μπορούν να συνδεθούν στο ηλεκτρικό κύκλωμα για να παρέχουν ισχύ πρόωσης

Αυτά τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθούν είτε χωριστά ή σε συνδυασμό με τις γεννήτριες. Σε αυτή τη διαμόρφωση, ο ηλεκτρισμός χρησιμοποιείται ως ενεργειακός φορέας μεταξύ του κινητήρα εσωτερικής καύσης και του κινητήρα πρόωσης, επομένως δεν υπάρχει άμεση μηχανική σύνδεση μεταξύ του κινητήρα και της προπέλας. Αυτή η διαμόρφωση επιτρέπει την αποσύνδεση των σημείων λειτουργίας του κινητήρα εσωτερικής καύσης και της προπέλας. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο αυτό το σύστημα επιτρέπει την αύξηση της συνολικής απόδοσης του συστήματος, βελτιστοποιώντας το σημείο λειτουργίας του κινητήρα εσωτερικής καύσης και της προπέλας από την άποψη της απόδοσης. Φυσικά, αυτό το πλεονέκτημα θα είναι

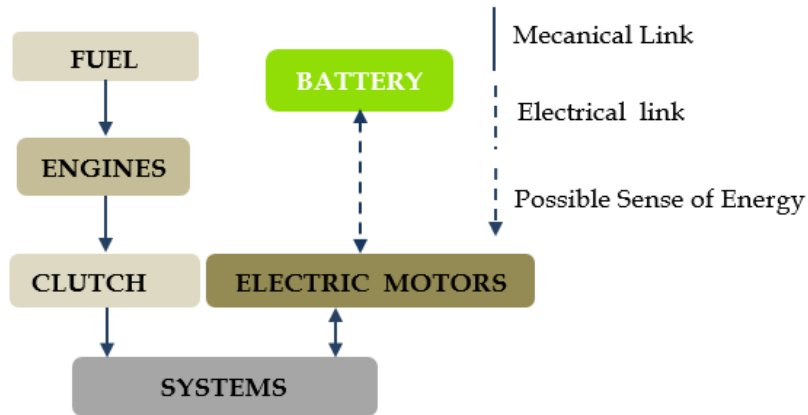
ακόμα πιο σημαντικό εάν χρησιμοποιούνται πολλές γεννήτριες και συστήματα αποθήκευσης, γεγονός που επιτρέπει την παροχή της απαιτούμενης ισχύος πρόωσης επιλέγοντας έναν βέλτιστο συνδυασμό πηγών ώστε να διατηρούνται οι λειτουργικοί κινητήρες καύσης στη βέλτιστη περιοχή λειτουργίας τους. Ωστόσο, για τα μικρά πλοία, η δυνατότητα αύξησης των πηγών είναι πολύ περιορισμένη λόγω όγκου και μάζας. (Menana, Billard, Bennabi, & Charpentier, 2016)



Σχήμα 3.3 Τυπική αρχιτεκτονική συστήματος σε σειρά (Menana, Billard, Bennabi, & Charpentier, 2016)

- ο Παράλληλα υβριδικά συστήματα

Ένα τυπικό σχήμα παράλληλης υβριδικής πρόωσης εμφανίζεται στο Σχήμα 3.3. Η παράλληλη υβριδική πρόωση συνδυάζει δύο είδη κινητήρων πρόωσης, ηλεκτροκινητήρες και κινητήρες εσωτερικής καύσης που συνδέονται μηχανικά με τους ίδιους άξονες μέσω κιβωτίων ταχυτήτων και συμπλέκτη.



Σχήμα 3.4 Τυπική αρχιτεκτονική παράλληλου συστήματος (Menana, Billard, Bennabi, & Charpentier, 2016)

Στους ηλεκτρικούς κινητήρες, η μετάδοση κίνησης παρέχεται από ηλεκτρικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας ή/και ανεξάρτητες πηγές ισχύος, όπως γεννήτριες που κινούνται από κινητήρες εσωτερικής καύσης ή/και κυψέλες καυσίμου. Τα δύο συστήματα πρόωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί ή χωριστά, ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις, ένα από τα συστήματα πρόωσης αφορά τη χρήση σε λειτουργίες χαμηλής ταχύτητας – συνήθως το ηλεκτρικό σύστημα - και το άλλο - ο κινητήρας εσωτερικής καύσης - χρησιμοποιείται για υψηλές ταχύτητες. Το πρώτο σύστημα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως σύστημα πρόωσης για την παροχή συμπληρωματικής ισχύος κατά τη διάρκεια μεταβατικών περιόδων, όπως η εκκίνηση και η επιτάχυνση. Αυτή η αρχιτεκτονική μειώνει τον αριθμό των στοιχείων σε σύγκριση με τα συστήματα σε σειρά και επιτρέπει τη βελτιστοποίηση του μεγέθους καθεμιάς από τις πηγές ενέργειας. (Menana, Billard, Bennabi, & Charpentier, 2016)

- ο Σειριακά - παράλληλα υβριδικά συστήματα

Η σειριακή-παράλληλη αρχιτεκτονική συνδυάζει και τις δύο αρχιτεκτονικές που ορίστηκαν προηγουμένως. Αυτή η συσχέτιση επιτρέπει τη μετάβαση μιας λειτουργίας παράλληλου τύπου σε μια λειτουργία σειριακού τύπου

Ο παρακάτω πίνακας δίνει μια σύγκριση μεταξύ των παράλληλων και σειριακών υβριδικών συστημάτων:

| | Σειριακά συστήματα | Παράλληλα συστήματα |
|--------------------------|---|--|
| Μέγεθος στοιχείων/κόστος | Για να είναι πλήρως αποδοτικό, το σύστημα πρέπει να συνδυάζει πολλές πηγές ισχύος με ονομαστική ισχύ ίση με το κλάσμα της συνολικής ισχύος. Το μέγεθος των ηλεκτροκινητήρων πρόωσης αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ. | Το σύστημα επιτρέπει τη βελτιστοποίηση του μεγέθους καθενός από τα συστήματα πρόωσης. Το μέγεθος του ηλεκτρικού κινητήρα είναι μειωμένο. Συμπληρωματικό κόστος και όγκος που σχετίζεται με το πολύπλοκο μηχανικό σύστημα που περιλαμβάνει συμπλέκτη και κιβώτια ταχυτήτων. |
| Ισχύς και απόδοση | Η απόδοση περιορίζεται από τον αριθμό των συστημάτων σε σειρά (κινητήρας, γεννήτρια, μετασχηματιστής, μετατροπείς, κινητήρες κ.λπ.). Το σύστημα επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο και τη σταδιακή μεταβολή της ταχύτητας της προπέλας. Εάν χρησιμοποιούνται πολλές πηγές, οι κινητήρες εσωτερικής καύσης μπορούν να λειτουργήσουν με μέγιστη απόδοση. | Καλή απόδοση που σχετίζεται με το μειωμένο αριθμό εξαρτημάτων σε σειρά (ιδιαίτερα κατά τη λειτουργία του κινητήρα εσωτερικής καύσης). Ακριβής έλεγχος και σταδιακή μεταβολή της ταχύτητας της προπέλας. Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης λειτουργεί με μέγιστη απόδοση. |
| Αξιοπιστία | Το σύστημα είναι αρθρωτό και προσφέρει πλεονασμό πηγών ενέργειας. | Πολύ υψηλό επίπεδο αυτονομίας αφού η ισχύς πρόωσης μπορεί να παρέχεται ανεξάρτητα από τα δύο συστήματα. Πολύπλοκο μηχανικό σύστημα που μπορεί να είναι αιτία βλάβης. |

Πίνακας 3.1 Σύγκριση υβριδικών συστημάτων (Menana, Billard, Bennabi, & Charpentier, 2016)

3.2 Αεριοστρόβιλοι (Gas turbines)

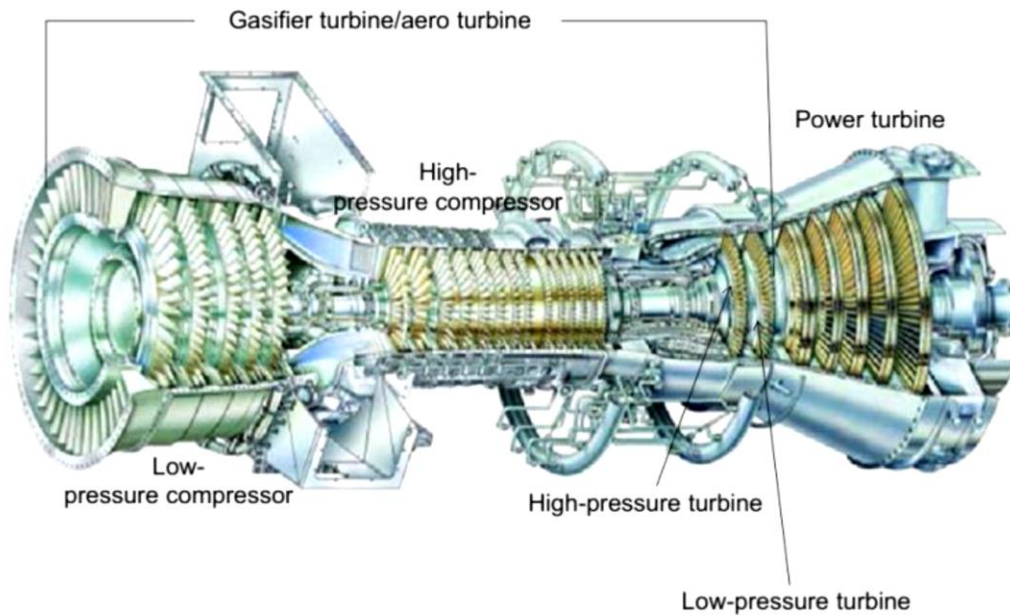
Οι αεριοστρόβιλοι προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα ισχύος σε σχετικά μικρά μεγέθη και χρησιμοποιούνται για διάφορους σκοπούς, από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έως το τομέα των μεταφορών και σε στρατιωτικά οχήματα, όπως αεριοθούμενα υψηλής ταχύτητας, πλοία και κινητήρες. Το σημαντικό χαρακτηριστικό των στρόβιλων - που τους καθιστά πιο φιλικούς προς το περιβάλλον από τους κινητήρες Diesel και ένας από τους λόγους που έχει καλύτερη αναλογία ισχύος/βάρους - είναι ότι η καύση στους στρόβιλους είναι συνεχής, με μέσες θερμοκρασίες και πιέσεις χαμηλότερες από τα ανωτέρα επίπεδα σε κινητήρες Diesel που ενισχύουν τις εκπομπές NO_x και ως εκ τούτου απαιτούν ισχυρότερες κατασκευές. Επιπλέον, οι αεριοστρόβιλοι μπορούν να λειτουργήσουν με ένα ευρύ φάσμα καυσίμων, συμπεριλαμβανομένου του φυσικού αερίου που εκτελεί καθαρότερη καύση. Ο λόγος είναι ότι οι κινητήρες συνεχούς ροής, όπως οι στρόβιλοι, αναπτύσσουν σταθερή αεροδυναμική και κινητική φλόγας και μειώνουν τους περιορισμούς που τίθενται στις ιδιότητες του καυσίμου για την καύση, όπως περιορισμούς για τον αριθμό οκτανίων ή τον δείκτη κετανίου. Επιπλέον, το θεμελιώδες χαρακτηριστικό της συνεχούς καύσης σε έναν κινητήρα στρόβιλου είναι ότι ο χρόνος παραμονής σε υψηλές θερμοκρασίες φλόγας - μια βασική αιτία σχηματισμού NO_x - μπορεί να ελεγχθεί.

Επειδή οι στρόβιλοι έχουν ευρεία λειτουργική ευελιξία και καλύπτουν ένα σημαντικό μέρος της παγκόσμιας συνολικής ενεργειακής ζήτησης, η βελτίωση της οικονομικής και οικολογικής τους απόδοσης αποτέλεσε σημαντικό μέλημα για τις κυβερνήσεις. Σύμφωνα με ορισμένες προβλέψεις, οι στρόβιλοι μπορεί να παρέχουν περισσότερο από το 80% της παραγωγικής ικανότητας των ΗΠΑ τις επόμενες δεκαετίες. Εκτός από την πρόοδο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κοινής ωφελείας, η εφαρμογή στρόβιλων σε θαλάσσια σκάφη έχει προχωρήσει σημαντικά από τα σκάφη της δεκαετίας του 1970 σε ένα ευρύ φάσμα εμπορικών και νέων τύπων σκαφών. Ιστορικά, τα μόνα μειονεκτήματα της προώθησης με στρόβιλους ήταν η υψηλή κατανάλωση καυσίμου, η χαμηλότερη απόδοση και η αδυναμία καύσης βαρέων καυσίμων. Με την πρόοδο στους στρόβιλους και τον σχεδιασμό του προωθητήρα, αυτά τα μειονεκτήματα έχουν ξεπεραστεί. Πλέον προσφέρουν υψηλό επίπεδο ευελιξίας όσον αφορά την κατασκευή σκαφών και τους περιορισμούς του κύκλου ζωής. (Kayadelen & Ust, 2013)

Τα χαρακτηριστικά που έχουν κάνει τους στροβίλους ελκυστικούς για ναυτικές εφαρμογές είναι:

- χαμηλό βάρος και όγκος,
- υψηλή αξιοπιστία,
- υψηλή ταχύτητα,
- ευκολία συντήρησης λόγω των αρθρωτών εξαρτημάτων τους,
- χαμηλό κόστος συντήρησης και
- χαμηλές εκπομπές ρύπων

Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τους στροβίλους ιδανικούς υποψηφίους για μελλοντικές μονάδες πρόωσης. Παρακάτω εμφανίζεται το σχέδιο ενός αεριοστροβίλου.

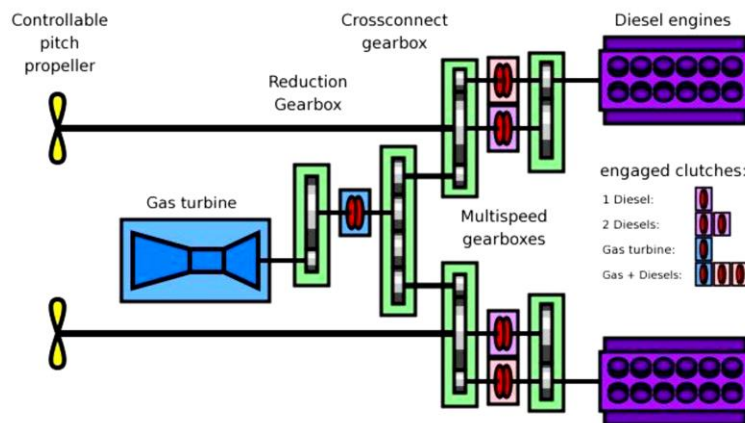


Σχήμα 3.5 Τομή αεριοστροβίλου (Kayadelen & Ust, 2013)

3.2.1 Συστήματα στρόβιλων για πρόωση πλοίων

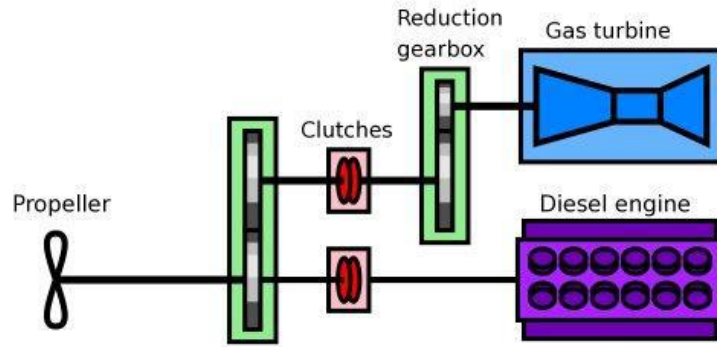
Οι στρόβιλοι, χρησιμοποιούνται αποκλειστικά ως μονάδες πρόωσης είτε σε συνδυασμό με άλλες μονάδες. Αυτά τα συστήματα επωφελούνται από τα πλεονεκτήματα των διαφορετικών κινητήρων. Μια σύντομη περιγραφή αυτών των συστημάτων εμφανίζεται παρακάτω:

- Το CODAG σημαίνει τουρμπίνα συνδυασμένου κύκλου Diesel και αερίου. Ο κινητήρας Diesel χρησιμοποιείται σε λειτουργία χαμηλής ισχύος και ο αεριοστρόβιλος λειτουργεί όταν απαιτείται υψηλή ισχύς (Σχήμα 3.6). (Kayadelen & Ust, 2013)



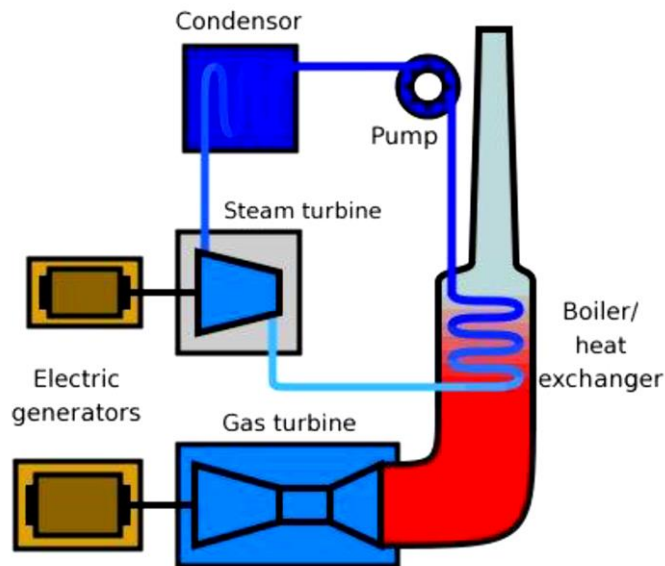
Σχήμα 3.6 Διάταξη CODAG (Kayadelen & Ust, 2013)

- Στα συστήματα συνδυασμένου Diesel ή στρόβιλου (CODOG) κάθε προπέλα έχει έναν κινητήρα Diesel και έναν στρόβιλο για υψηλές ταχύτητες. Ο στρόβιλος ή ο κινητήρας Diesel μπορούν να λειτουργήσουν μόνο ξεχωριστά λόγω της απλής διάταξης του κιβωτίου μετάδοσης. Αυτό απαιτεί μεγαλύτερο στρόβιλο για την ίδια ζήτηση ισχύος και χρησιμοποιείται γενικά σε στρατιωτικά πλοία που χρειάζονται πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες από τις ταχύτητες πλεύσης. (Kayadelen & Ust, 2013)



Σχήμα 3.7 Διάταξη CODOG (Kayadelen & Ust, 2013)

- Η COGAG, είναι σύστημα συνδυασμένου αερίου και ατμού και έχει δύο διαφορετικά είδη στροβίλων με διαφορετική ισχύ. Οι στρόβιλοι λειτουργούν στις συνθήκες σχεδιασμού τους και η μέγιστη απόδοση παρέχεται σε διαφορετικές ταχύτητες πλεύσης. Σε πλήρη ισχύ και οι δύο στρόβιλοι λειτουργούν ταυτόχρονα. (Kayadelen & Ust, 2013)



Σχήμα 3.8 Διάταξη COGAG (Kayadelen & Ust, 2013)

Υπάρχουν επίσης και ηλεκτρικά συστήματα που χρησιμοποιούνται στη θαλάσσια πρόωση. Σε αυτά τα συστήματα, οι κινητήρες περιστρέφουν μια γεννήτρια που τροφοδοτεί τους ηλεκτρικούς κινητήρες οι οποίοι δίνουν κίνηση στη προπέλα. Καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο και έχουν βελτιωμένη ικανότητα ελιγμών και ικανότητα διατήρησης του ρυθμού λειτουργίας – ο ακριβής έλεγχος των ηλεκτροκινητήρων πρόωσης επιτυγχάνεται από τους μετατροπείς συχνότητας. Οι κινητήρες λειτουργούν με σταθερή ταχύτητα, ώστε οι εκπομπές ρύπων να είναι οι ελάχιστες. Η διάταξη CODEG αποτελείται από ηλεκτρικούς κινητήρες που λειτουργούν με γεννήτριες και έναν αεριοστρόβιλο. Η διάταξη που συνδυάζει ηλεκτρικούς κινητήρες και στρόβιλους αερίου συνδυασμένου κύκλου είναι επίσης γνωστή ως COGAS. Η θερμότητα για το πλοίο παρέχεται γενικά από τον στρόβιλο σε αυτές τις διατάξεις. Δεν απαιτείται επιπλέον καύσιμο για την τουρμπίνα ατμού, επομένως υπάρχει κέρδος απόδοσης 15 - 18 % στην ονομαστική ισχύ σε σύγκριση με το απλό σύστημα πρόωσης στροβίλου. (Kayadelen & Ust, 2013)

- Αεριοστρόβιλοι σε διαφορετικά είδη πλοίων

Οι αεριοστρόβιλοι προτιμώνται συνήθως στα στρατιωτικά πλοία λόγω της συμπαγούς κατασκευής τους, της υψηλής πυκνότητας ισχύος, της επιτάχυνσης και του χαμηλού χρόνου εκκίνησης. Χωρίς να απαιτείται χρόνος προθέρμανσης, όπως σε ένα δίχρονο κινητήρα Diesel, είναι έτοιμοι να λειτουργήσουν με πλήρη ισχύ σε μόλις 30 δευτερόλεπτα. Χρησιμοποιούνται σε πλοία του ναυτικού από το 1947, με πρώτο το Royal Navy's Motor Gun Boat MGB 509.

Μελέτες σε κρουαζιερόπλοια που κατασκευάστηκαν τα τελευταία χρόνια έδειξαν ότι το μηχανοστάσιο αντιπροσωπεύει συνήθως το 8% έως 17,5% του συνολικού χώρου του σκάφους. Αξιοποιώντας πλήρως τα πλεονεκτήματα εξοικονόμησης χώρου που προσφέρουν οι ισχυροί και συμπαγείς αεριοστρόβιλοι, περίπου το 75% αυτού του όγκου μπορεί να μετατραπεί σε παραγωγικό χώρο. Εκτός από αυτές τις βασικές απαιτήσεις, οι επιβάτες θεωρούν ότι τα μηχανήματα του πλοίου δεν πρέπει να είναι ορατά ή να ακούγονται κατά τη λειτουργία τους. Αντίστοιχα, οι μονάδες συνδυασμένου αερίου και ατμού (COGES) σε κρουαζιερόπλοια έχουν αποδείξει τα συνολικά πλεονεκτήματά τους σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα κινητήρων Diesel. Μείωσαν δραματικά τις

εκπομπές καυσαερίων, καθώς και τον θόρυβο και τους κραδασμούς και επιπλέον χρειάζονται 50% λιγότερα βοηθητικά συστήματα. Η πρώτη εφαρμογή COGES το 2000 εξοικονόμησε βάρος 900 τόνων και χώρο για έως και 50 επιπλέον καμπίνες επιβατών σε κάθε πλοίο, συν επιπλέον χώρο για 20 καμπίνες πληρώματος και κοινόχρηστους χώρους. (Kayadelen & Ust, 2013)

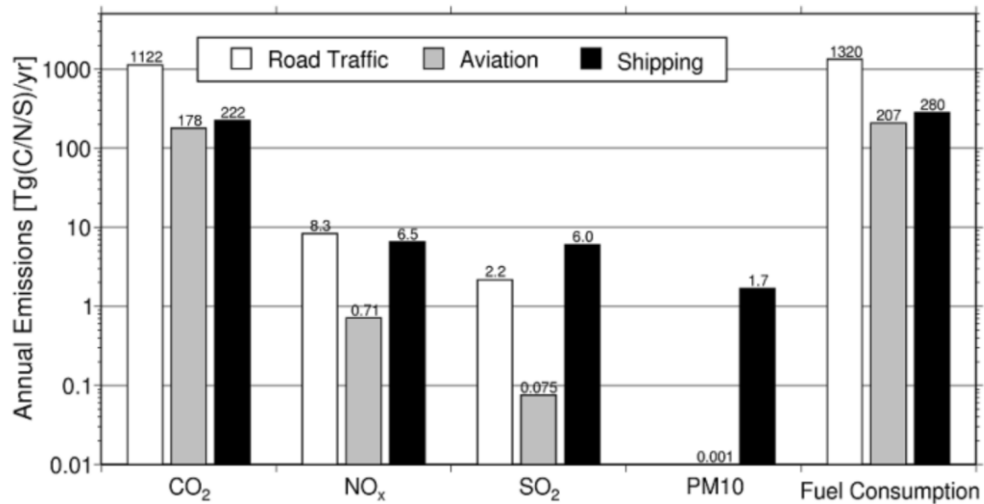
3.2.2 Περιβαλλοντικά ζητήματα

Τα πλοία συμβάλλουν σημαντικά στη ρύπανση στις παράκτιες κοινότητες. Πρόσφατες μελέτες έχουν υπολογίσει ότι περίπου το 15% των παγκόσμιων εκπομπών NO_x οφείλονται σε στη ναυτιλία. Δεδομένου ότι σχεδόν το 70% των εκπομπών των πλοίων συμβαίνει σε απόσταση 400 km από την ξηρά, είναι φανερό ότι τα πλοία συμβάλουν σε σημαντική ρύπανση στις παράκτιες κοινότητες. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι εκπομπές μικροσωματιδίων που σχετίζονται με τη ναυτιλία ευθύνονται για περίπου 60.000 θανάτους ετησίως σε παγκόσμια κλίμακα. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας τη χρήση αεριοστροβίλων καθαρού καυσίμου σε θαλάσσια πλοία καθώς μπορεί να επιτευχθεί σχεδόν 100% μείωση των εκπομπών SO_x και των σωματιδίων, 85-90% μείωση στις εκπομπές NO_x και 15-20% μείωση στις εκπομπές CO₂. Ο Πίνακας 3.2 δίνει μια σύγκριση των εκπομπών μεταξύ των κινητήρων Diesel και των αεριοστροβίλων σε g/kg καυσίμου και αποτελεί μέτρο των εκπομπών ανεξάρτητα από την τεχνολογία του κινητήρα. (Kayadelen & Ust, 2013)

| Ρύπος | Κινητήρας Diesel (g/kg καυσίμου) | Αεριοστρόβιλος (g/kg καυσίμου) | % Μεταβολή |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------|
| SO _x | 54 | 7.6 | -86 |
| NO _x | 87 | 28.6 | -67 |
| PM | 7.6 | 1.1 | -85 |
| CO | 7.4 | 0.14 | -98 |
| VOC | 2.7 | 0.05 | -98 |

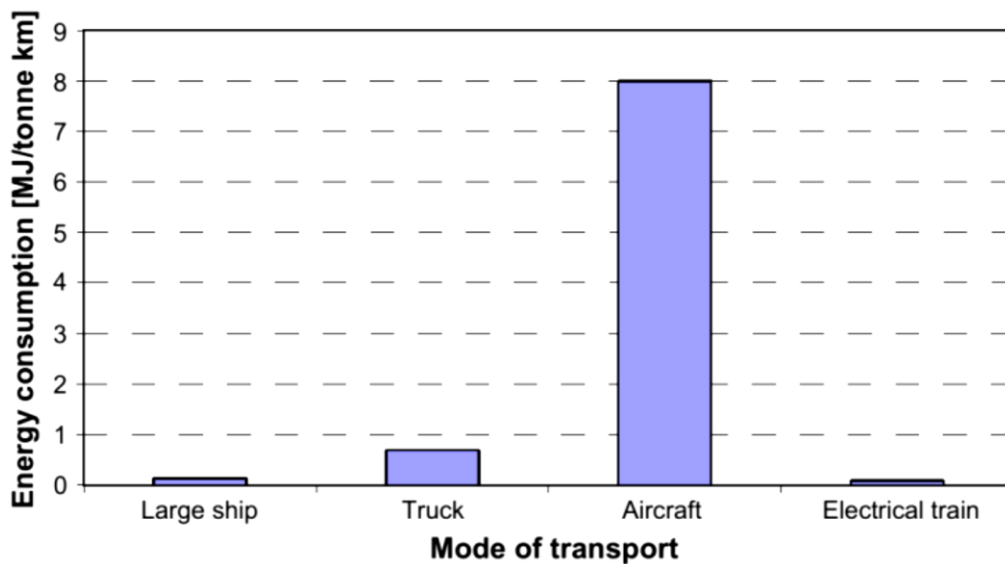
Πίνακας 3.2 Εκπομπές κινητήρων Diesel – αεριοστροβίλων (Kayadelen & Ust, 2013)

Το Σχήμα 3.9 δείχνει τη συμβολή της ναυτιλίας στις ετήσιες παγκόσμιες εκπομπές.



Σχήμα 3.9 Η συμβολή της ναυτιλίας στις ετήσιες παγκόσμιες εκπομπές (Kayadelen & Ust, 2013)

Από το Σχήμα 3.9 μπορεί κανείς να καταλάβει ότι η ναυτιλία συμβάλλει σημαντικά στην παγκόσμια ρύπανση, αλλά από την άλλη εξοικονομείται τεράστια ποσότητα ενέργειας από τις θαλάσσιες μεταφορές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10 Εξοικονόμηση ενέργειας από τις θαλάσσιες μεταφορές (Kayadelen & Ust, 2013)

3.3 Κυψέλες καυσίμων (Fuel cells)

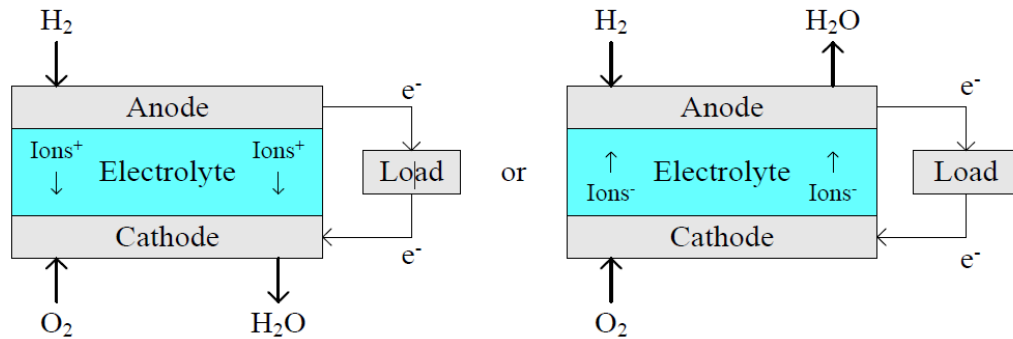
Τα εναλλακτικά καύσιμα αναμένεται να διαδραματίσουν ζωτικό ρόλο ως βασική λύση για τη μείωση των εκπομπών SO_x, NO_x, PM και CO₂. Εκτός από καινοτόμες τεχνολογίες και συστήματα για παραδοσιακούς κινητήρες, τα συστήματα ισχύος κυψελών καυσίμου προτείνονται ως σημαντική επιλογή για τη βελτίωση της χρήσης εναλλακτικών ναυτιλιακών καυσίμων. Η υψηλή ενεργειακή απόδοση καθιστά τις κυψέλες καυσίμου πολύ ελκυστικές σε σύγκριση με τους κινητήρες καύσης και τους αεριοστρόβιλους, αν και η ισχύς των κυψελών καυσίμου δεν μπορούν να καλύψουν όλες τις θαλάσσιες εφαρμογές. Ωστόσο, η απόδοση και η ισχύς των κυψελών καυσίμου εξακολουθούν να αποτελούν κομβικό σημείο έρευνας και ανάπτυξης, οδηγώντας σε συνεχείς βελτιώσεις που φέρνουν τη συγκεκριμένη τεχνολογία πιο κοντά στην ευρεία υιοθέτηση. Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται στα υποβρύχια οχήματα ήδη από τη δεκαετία του 1960. Πιθανές εφαρμογές κυψελών καυσίμου σε εμπορικά πλοία περιλαμβάνουν (Xing, Stuart, Spence, & Chen, 2021):

- Κύρια πρόωση χαμηλής ζήτησης ισχύος,
- βοηθητική ισχύς για υβριδική πρόωση,
- παροχή ρεύματος έκτακτης ανάγκης.

3.3.1 Τύποι κυψελών καυσίμου

Μια κυψέλη καυσίμου αποτελείται από μια άνοδο, μια κάθοδο και έναν ηλεκτρολύτη και μετατρέπει τη χημική ενέργεια από ένα καύσιμο σε ηλεκτρική μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Ένα βασικό σχηματικό διάγραμμα μιας κυψέλης καυσίμου υδρογόνου φαίνεται στο Σχήμα 3.10, όπου οι δύο εικόνες απεικονίζουν τα διαφορετικά πιθανά χαρακτηριστικά μεταφοράς ιόντων στον ηλεκτρολύτη ανάλογα με τον τύπο της κυψέλης καυσίμου. Μόνο ένα πολύ μικρό ηλεκτρικό δυναμικό, περίπου 0,7 βολτ (V), παράγεται από μια μεμονωμένη κυψέλη καυσίμου. Ως εκ τούτου, οι κυψέλες τοποθετούνται σε σειρά για να δημιουργήσουν επαρκή τάση για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις μιας εφαρμογής, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια στήλη κυψελών

καυσίμου. Οι κυψέλες καυσίμου ταξινομούνται συνήθως ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν (Xing, Stuart, Spence, & Chen, 2021).



Σχήμα 3.11 Διάταξη κυψελών καυσίμου (Xing, Stuart, Spence, & Chen, 2021)

Οι τυπικές κυψέλες καυσίμου και οι ηλεκτροχημικές τους αντιδράσεις συνοψίζονται στον Πίνακα 3.3.

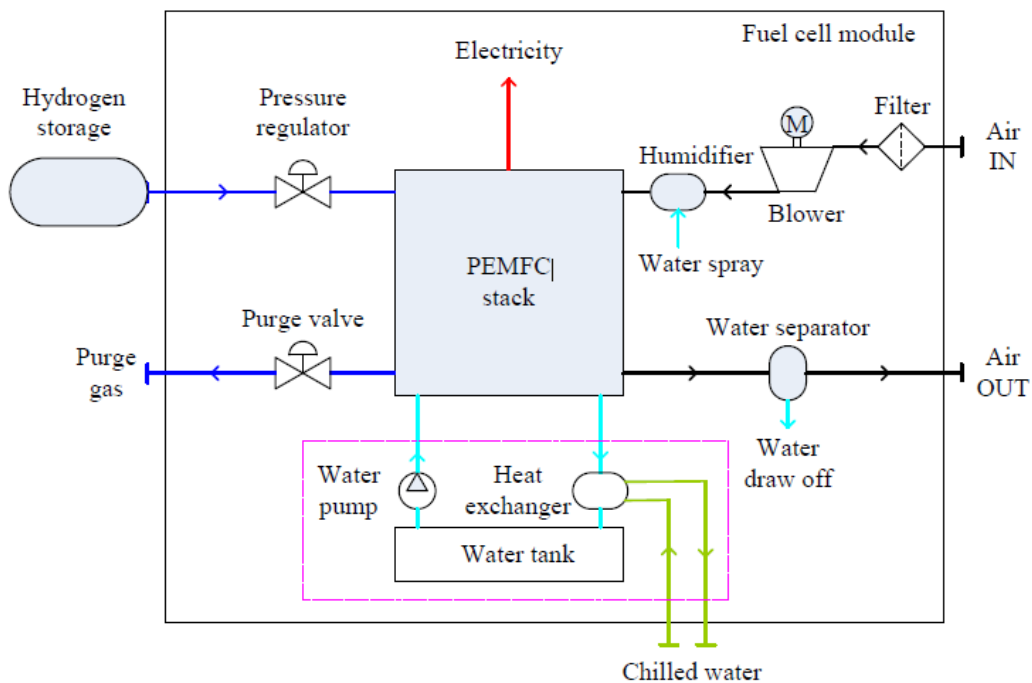
| Types | Typical Materials of Electrodes | | Electrolyte | Typical Fuels | Electrochemical Reactions | |
|----------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--|--|---|
| | Anode | Cathode | | | Anode | Cathode |
| AFC | nickel | silver | potassium hydroxide | H ₂ | $2\text{H}_2 + 4\text{OH}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$ | $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ |
| PEMFC | platinum | platinum | water-based polymer membrane | H ₂ | $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ | $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ |
| HT-PEMFC | platinum | platinum | mineral acid-based polymer membrane | H ₂ | $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ | $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ |
| PAFC | platinum-carbon | platinum-carbon | phosphoric acid | H ₂ , LNG and methanol | $2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ | $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ |
| DMFC | platinum-ruthenium | platinum-ruthenium | water-based polymer membrane | methanol | $2\text{CH}_3\text{OH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 12\text{H}^+ + 2\text{CO}_2 + 12\text{e}^-$ | $3\text{O}_2 + 12\text{H}^+ + 12\text{e}^- \rightarrow 6\text{H}_2\text{O}$ |
| MCFC | nickel alloy | nickel oxide-lithium | molten carbonate salt | H ₂ , methanol and hydrocarbons | $2\text{H}_2 + 2\text{CO}_3^{2-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 + 4\text{e}^-$ | $\text{O}_2 + 2\text{CO}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{CO}_3^{2-}$ |
| SOFC | nickel alloy | lanthanum strontium manganite | porous ceramic material | H ₂ , methanol and hydrocarbons | $2\text{H}_2 + 2\text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$ | $\text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{O}^{2-}$ |

Πίνακας 3.3 Τύποι κυψελών καυσίμου (Xing, Stuart, Spence, & Chen, 2021)

- PEMFC: Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας των PEMFC επιτρέπει την ευέλικτη και ασφαλή λειτουργία, λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις για τα υλικά κατασκευής και γρήγορη εκκίνηση. Ωστόσο, η χαμηλή θερμοκρασία οδηγεί επίσης σε έλλειψη επιλογών ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας και σε ένα περίπλοκο σύστημα διαχείρισης του νερού ψύξης. Επιπλέον, οι καταλύτες πλατίνας αυξάνουν το κόστος του συστήματος και μπορούν να δηλητηριαστούν από μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και θείο (S). Επομένως, μια μονάδα αναμόρφωσης και καθαρισμού είναι απαραίτητη

για να επιτευχθεί η απαιτούμενη καθαρότητα υδρογόνου εάν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα υδρογονάνθρακες αντί για καθαρό υδρογόνο (Xing, Stuart, Spence, & Chen, 2021).

Ένα σύστημα PEMFC αποτελείται από μια μονάδα παροχής υδρογόνου, μια μονάδα παροχής αέρα και μια μονάδα ψύξης. Ένα σχηματικό διάγραμμα μιας μονάδας PEMFC φαίνεται στο Σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12 Διάγραμμα μιας μονάδας PEMFC (Xing, Stuart, Spence, & Chen, 2021)

Το υδρογόνο αποθηκεύεται στη δεξαμενή αποθήκευσης σε κρυογονική υγροποιημένη κατάσταση ή υπό πίεση 350–700 bar. Η πίεση του υδρογόνου ρυθμίζεται από τον ρυθμιστή πίεσης. Μια βαλβίδα εξαέρωσης στην έξοδο του θαλάμου ανόδου ανοίγει περιοδικά για να αποτρέψει τη μείωση της τάσης της κυψέλης κάτω από ένα ορισμένο όριο. Επιπλέον, βοηθητικά εξαρτήματα μεταξύ της εισόδου και της εξόδου καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανακυκλοφορία του υδρογόνου. Ο φιλτραρισμένος αέρας συμπιέζεται από έναν ανεμιστήρα και στη

συνέχεια υγραίνεται για να διατηρηθεί η απόδοση της πολυμερούς μεμβράνης εντός των κυψελών καυσίμου.

Για θαλάσσιες εφαρμογές, μπορεί να προκύψει η αποικοδόμηση της πολυμερούς μεμβράνης λόγω της έκθεσης της καθόδου στις συνθήκες του θαλάσσιου αέρα. Επομένως, μπορεί να απαιτείται κατάλληλη προεπεξεργασία του αέρα εισόδου για την απομάκρυνση των ατμών χλωριούχου νατρίου. Η θερμότητα που παράγεται από τη μονάδα αφαιρείται από μια μονάδα ψύξης, η οποία περιλαμβάνει μια δεξαμενή νερού, μια αντλία νερού και έναν εναλλάκτη θερμότητας. Ο εναλλάκτης θερμότητας μεταφέρει τη θερμότητα στο ψυχρό θαλασσινό νερό (Xing, Stuart, Spence, & Chen, 2021).

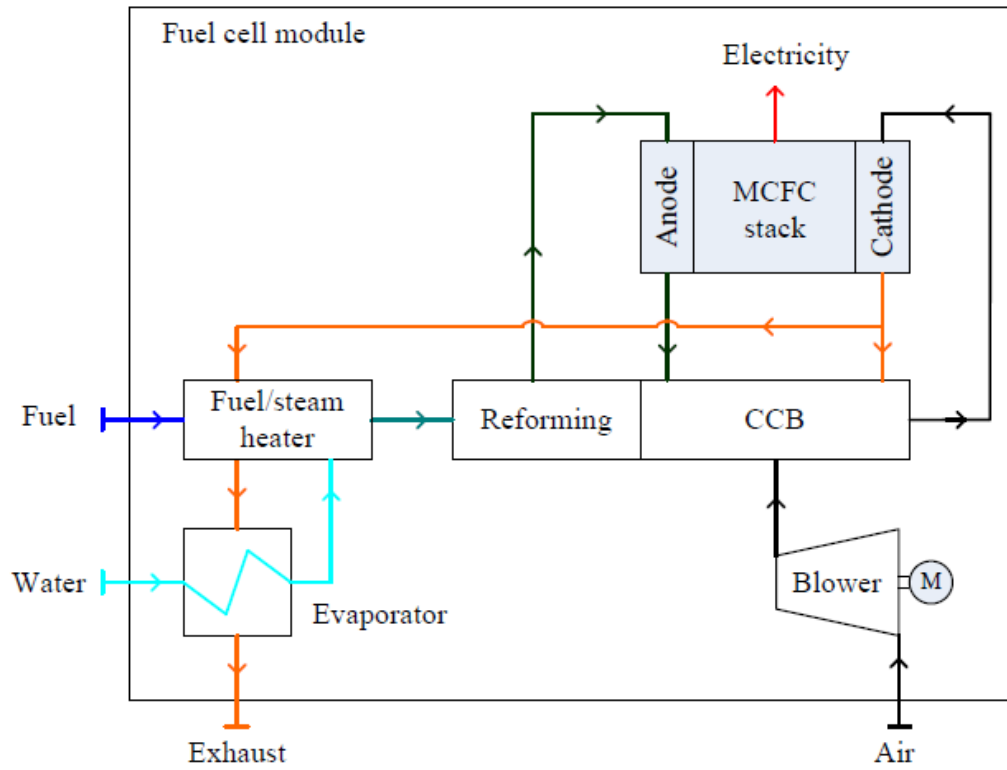
- MCFC: Ο τύπος MCFC έχει σχετικά υψηλό κόστος και λειτουργεί σε θερμοκρασίες στην περιοχή 600–700 °C. Λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας, εκτός από το καθαρό υδρογόνο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα το LNG, η μεθανόλη και υδρογονάνθρακες. Δεν υπάρχουν εκπομπές CO₂ εάν το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως καύσιμο, καθώς το CO₂ κυκλοφορεί μόνο στις κυψέλες καυσίμου για την αναγέννηση του ανθρακικού άλατος στον ηλεκτρολύτη. Η χρήση υδρογονανθράκων ως καυσίμου οδηγεί σε εκπομπές CO₂, αλλά δεν υπάρχουν εκπομπές NO_x καθώς δεν υπάρχει ατμοσφαιρικός αέρας όταν πραγματοποιείται η αναμόρφωση στην άνοδο. Ο τύπος MCFC είναι μια κυψέλη καυσίμου υψηλής απόδοσης, με καταλύτη και ηλεκτρολύτες χαμηλού κόστους και υψηλή ευελιξία έναντι των καυσίμων και των ρύπων. Ενώ η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας το καθιστά κατάλληλο για συστήματα ανάκτησης ενέργειας, καθιστά επίσης τα συστήματα MCFC ευάλωτα σε βλάβες όπως η διάβρωση και οι ρωγμές εξαρτημάτων. Το MCFC έχει αργή εκκίνηση και είναι λιγότερο ευέλικτο στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις ισχύος από τις κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας. Ο συνδυασμός MCFC με μπαταρίες/υπερπυκνωτές ή ηλεκτρόλυση για πιο σταθερή λειτουργία της κυψέλης καυσίμου θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά την καταπόνηση από τον θερμικό κύκλο. Αυτό θα μπορούσε επίσης να επιτρέψει πιο ευέλικτη λειτουργία με ταχύτερη εκκίνηση και τη δυνατότητα να καλυφθούν οι μεταβαλλόμενες απαιτήσεις ισχύος. Οι διατάξεις MCFC είναι εμπορικά διαθέσιμες,

αλλά εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν υψηλό κόστος, περιορισμένη διάρκεια ζωής και χαμηλή πυκνότητα ισχύος (Xing, Stuart, Spence, & Chen, 2021).

Η διάταξη μιας μονάδας MCFC εμφανίζει έναν αριθμό διαφορετικών διαμορφώσεων ανάλογα με τις απαιτούμενες παραμέτρους σχεδίασης:

(i) Ένα ατμοσφαιρικό σύστημα ή ένα σύστημα υπό πίεση. Ένα ατμοσφαιρικό σύστημα MCFC λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση. Ωστόσο, ένα σύστημα MCFC υπό πίεση έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε αυξημένη πίεση, όπου το πεπιεσμένο οξειδωτικό οδηγείται στη κυψέλη MCFC και το αέριο που εξέρχεται είναι σε πίεση 3–4 bar. Το σύστημα MCFC υπό πίεση είναι πιο ανταγωνιστικό λόγω της υψηλότερης απόδοσης και της αυξημένης πυκνότητας ισχύος.

(ii) Ένα αυτόνομο ή ένα υβριδικό σύστημα. Ένα αυτόνομο σύστημα MCFC σημαίνει ότι η κυψέλη MCFC είναι το μόνο εξάρτημα που παράγει την ηλεκτρική ισχύ. Ωστόσο, το ηλεκτρικό ή μηχανικό έργο ενός υβριδικού συστήματος MCFC εξάγεται τόσο από τη κυψέλη MCFC όσο και από τον διαστολέα. Το αυτόνομο σύστημα MCFC είναι απλό και αξιόπιστο, ωστόσο το υβριδικό σύστημα MCFC έχει σημαντικά πλεονεκτήματα για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας επειδή η εξαιρετικά εξώθερμη ηλεκτροχημική αντίδραση και η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας το καθιστούν κατάλληλο για τη λειτουργία ενός θερμοδυναμικού κύκλου - κύκλος Rankine ή κύκλος Brayton. Η διάταξη μιας κυψέλης MCFC εμφανίζεται παρακάτω (Xing, Stuart, Spence, & Chen, 2021):



Σχήμα 3.13 Διάταξη μιας κυψέλης MCFC (Xing, Stuart, Spence, & Chen, 2021)

Κεφάλαιο 4: Τεχνο-οικονομική ανάλυση

4.1 Μεθοδολογία

Στη συνέχεια ακολουθεί η οικονομική σύγκριση των προηγμένων καυσίμων μετά την εφαρμογή τους σε ορισμένες μελέτες περίπτωσης. Για την αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκε μία προσέγγιση που βασίζεται στο πραγματικό κόστος της επένδυσης που επιβαρύνει τους πλοιοκτήτες και στο λειτουργικό κόστος των διαφορετικών επιλογών, σε σχέση με την ποσότητα του καυσίμου που καταναλώνεται. Η κατανάλωση εκφράζεται σε kWh. Το μοντέλο περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- Τις κεφαλαιουχικές δαπάνες
- Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας
- Το κόστος κατανάλωσης καυσίμου

Ενώ η χρήση του LNG φαίνεται να κατακλύζει τις θαλάσσιες μεταφορές, η ανάγκη για μείωση των ρύπων κάνει πιο ελκυστική την προσπάθεια για πλήρη απανθρακοποίηση της ναυτιλίας. Συμβάλλοντας στην προσπάθεια αυτή, η παρούσα αξιολόγηση θα εξετάσει την αμμωνία, τη μεθανόλη και το υδρογόνο ως καύσιμα ουδέτερου αποτυπώματος άνθρακα.

4.2 Παραδοχές της ανάλυσης

Ο ναυτιλιακός κλάδος είναι αρκετά διαφοροποιημένος και περιλαμβάνει μια μεγάλη ποικιλία τύπων πλοίων, τα οποία διαφέρουν όχι μόνο ως προς το μέγεθος και το φορτίο, αλλά έχουν επίσης πολύ διαφορετικές απαιτήσεις ισχύος και λειτουργικά προφίλ.

Για την αντιμετώπιση αυτής της ποικιλομορφίας, η τεχνοοικονομική ανάλυση πραγματοποιήθηκε χωριστά για 2 διαφορετικούς τύπους πλοίων που καλύπτουν :

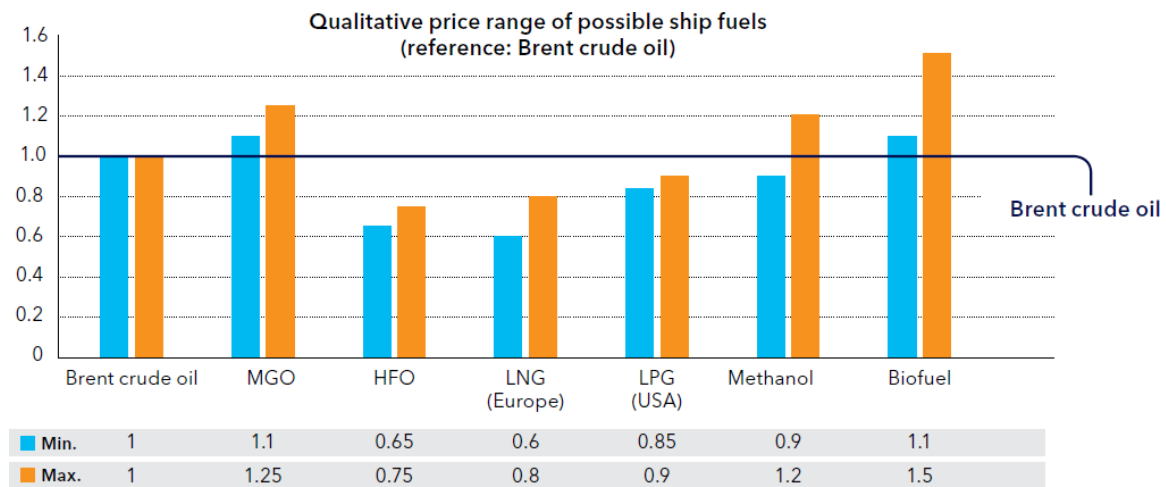
- Επιβατικά πλοία
- Δεξαμενόπλοια

Μια άλλη βασική υπόθεση που έχει αντίκτυπο στα συνολικά αποτελέσματα είναι η ελάχιστη απόσταση που μπορεί ένα πλοίο να διανύσει με γεμάτη δεξαμενή. Όσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη εμβέλεια, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας των καυσίμων στην υπόθεση, καθώς όλο και περισσότερη χωρητικότητα ωφέλιμου φορτίου των πλοίων πρέπει να αφιερώνεται σε πρόσθετη αποθήκευση καυσίμου.

4.3 Τιμές καυσίμων και παράγοντες

Οι τιμές καυσίμων (ειδικά για φυσικό αέριο και ηλεκτρικό ρεύμα) ποικίλλουν για κάθε γεωγραφική ζώνη, φορολογικά καθεστάτα (π.χ. βενζίνη ή ντίζελ), συντελεστές χωρητικότητας (π.χ. για ηλιακή φωτοβολταϊκή και αιολική χωρητικότητα), ένταση εκπομπών ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικά χαρακτηριστικά για κάθε χώρα (IEA, 2020). Αντιπροσωπεύεται δε από την εκτιμώμενη σχετική διαφορά τιμής / κόστους μεταξύ των καυσίμων που ερευνήθηκαν με βάση την τιμή τους (όταν είναι διαθέσιμη), εκτιμήσεις κόστους παραγωγής και εκτιμήσεις τιμών πρώτων υλών και αποδοτικότητας παραγωγής καυσίμων (Hansson, Mansson, Brynolf, & Grahn, 2019).

Η τιμή του καυσίμου κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου, ή η επιθυμητή απόδοση επένδυσης (ROI) για μια δεδομένη περίοδο, είναι συχνά ο πιο σχετικός παράγοντας επιχειρηματικής επένδυσης. Η τιμολόγηση των καυσίμων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των συνθηκών της αγοράς, που είναι δύσκολο ή αδύνατο να προβλεφθούν. Για τη Διεθνή Ναυτιλία θα πρέπει να τονιστεί ότι επιδοτήσεις για τα προτιμώμενα καύσιμα δεν υπάρχουν επειδή τα καύσιμα πλοίων έχουν ήδη φοροαπαλλαγή (Abbasov, 2019). Απομένει να δούμε αν αυτό θα αλλάξει, για παράδειγμα μέσω της εισαγωγής ενός προγράμματος τελών CO₂ (DNV GL, 2019b).



Source: DNV GL, IEA

Γράφημα 1. Συγκριτική διακύμανση τιμών των εναλλακτικών καυσίμων βάση του Brent Crude Oil (Πηγή: DNV GL, 2019b).

Σύμφωνα με το Γράφημα 1. Συγκριτική διακύμανση τιμών των εναλλακτικών καυσίμων βάση του Brent Crude Oil (Πηγή: DNV GL, 2019b). του DNV GL (MARITIME FORECAST TO 2050, 2019b), το κόστος καυσίμου κυμαίνεται αναλόγως την προέλευση παραγωγής ή την μετέπειτα διαδικασία. Σήμερα η μεθανόλη παράγεται κυρίως από φυσικό αέριο. Για το λόγο αυτό, η τιμή της μεθανόλης είναι συνήθως πάνω από την τιμή του φυσικού αερίου. Η χαμηλότερη τιμή στο γράφημα αναφέρεται στη μεθανόλη που παράγεται από αέριο, ενώ το η ανώτερη τιμή αντικατοπτρίζει τη μεθανόλη που παράγεται από βιομάζα (DNV GL, 2019b). Τα εναλλακτικά καύσιμα που παράγονται από ορυκτές πρώτες ύλες είναι γενικά φθηνότερα από τα βιοκαύσιμα και έχουν μεγαλύτερη διαθεσιμότητα (Zhou, Pavlenko, Rutherford, Osipova, & Comer, 2020).

Επιπλέον το γράφημα δείχνει ότι μόνο το LNG και το LPG σε κάποιο βαθμό, μπορούν να ανταγωνιστούν αυτή τη στιγμή το HFO σε όρους αγοραίας τιμής. Η μεθανόλη και τα βιοκαύσιμα μπορεί τελικά να είναι σε θέση να ανταγωνιστούν με το MGO έως κάποιο βαθμό.

Ωστόσο, τα HVO, FAME και LBG είναι πιο ακριβά από τα ορυκτά τους. Η αγορά για αυτά τα καύσιμα κρίνεται ανώριμη ακόμα και οι πληροφορίες για τις τιμές είναι πολύ περιορισμένες. Δεν πρέπει να παραβλεφθούν επίσης οι τοπικές και περιφερειακές διακυμάνσεις στην τιμή και τη διαθεσιμότητα. Πάραυτα, η αγορά βιοκαυσίμων αναμένεται να αναπτυχθεί, και αυτό θα συμβάλει και στην μείωση του κόστους, με την αγορά του HVO να είναι υψηλότερη από ό, τι για το FAME. Για την επίτευξη της μείωσης όμως θα παίξουν σημαντικό ρόλο οι συνεχείς βελτιώσεις της διαδικασίας, οι τεχνολογικές εξελίξεις και η κλιμάκωση της παραγωγής (DNV GL, 2019b).

Σημαντική πληροφορία είναι ότι τα φθηνότερα και σε ποσότητα εναλλακτικά καύσιμα δεν είναι απαραίτητα εκείνα που προσφέρουν την καλύτερη εξοικονόμηση των GHG (Zhou, Pavlenko, Rutherford, Osipova, & Comer, 2020).

| Energy source | Fossil (without CCS) | | | | | Bio | Renewable ⁽³⁾ | | | |
|--|----------------------|----------------|-------------------|------------------|----------|-----|--------------------------|---------|----------|------------------|
| | Fuel | HFO + scrubber | Low sulphur fuels | LNG | Methanol | LPG | HVO (Advanced biodiesel) | Ammonia | Hydrogen | Fully-electric |
| High priority parameters | | | | | | | | | | |
| • Energy density | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| • Technological maturity | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| • Local emissions | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| • GHG emissions | | ● | ● | ● ⁽²⁾ | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| • Energy cost | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● ⁽⁴⁾ |
| • Capital cost | Converter | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| | Storage | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| • Bunkering availability | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| Commercial readiness ⁽¹⁾ | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● ⁽⁵⁾ |
| Other key parameters | | | | | | | | | | |
| • Flammability | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| • Toxicity | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| • Regulations and guidelines | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| • Global production capacity and locations | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |

Γράφημα 2 Σύγκριση διαφορετικών παραμέτρων σε εναλλακτικές πηγές ενέργεια ορυκτές και μη (Πηγή: DNV GL, 2019b).

Ο χρόνος για την εμπορική διαθεσιμότητα ελπιδοφόρων εναλλακτικών καυσίμων θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από το επίπεδο των προσπαθειών Ευρώπης και Αμερικής, και ακόμη πιο πολύ από το επίπεδο και την ταχύτητα εφαρμογής των περιβαλλοντικών κανονισμών και την ανάπτυξη προγραμμάτων παροχής κινήτρων. Όπως φάνηκε στην παραπάνω μελέτη περιπτώσεων Γράφημα 1. Συγκριτική διακύμανση τιμών των εναλλακτικών καυσίμων βάση του Brent Crude Oil (Πηγή: DNV GL, 2019b)., πολλά από τα υποσχόμενα εναλλακτικά καύσιμα πλοίων είναι πολύ πιο ακριβά από τις υπάρχουσες λύσεις και το ποσοστό υιοθέτησης θα είναι μικρό / στο πιλοτικό στάδιο έως ότου οι κανονισμοί ή τα συστήματα κινήτρων τα καταστήσουν πιο ανταγωνιστικά. Και φυσικά στον αντίποδα των μέτρων που θα υπάρξουν, έρχεται το κόστος. Αναλυτές όπως οι (Buhaug, Faber, & Eyring, 2009) υποστηρίζουν ότι η εφαρμογή μέτρων μείωσης των εκπομπών είναι απαγορευτική ως προς το κόστος, ωστόσο τα κέρδη απόδοσης θα μπορούσαν να εξοικονομήσουν στη ναυτιλιακή βιομηχανία 50 δισεκατομμύρια δολάρια το χρόνο στο κόστος των καυσίμων, μειώνοντας παράλληλα τις εκπομπές κατά 220 εκατομμύρια μετρικούς τόνους ετησίως. Δεδομένου ότι τα καύσιμα είναι η πιο δαπανηρή πτυχή της λειτουργίας του πλοίου, καθώς αυξάνεται το κόστος των καυσίμων, υπάρχει

μεγαλύτερο κίνητρο για τους διαχειριστές να εντοπίσουν καινοτόμους τρόπους μείωσης της σχετικής κατανάλωσης (UNEP, 2012).

Προς το παρόν, το κόστος των συνθετικών καυσίμων είναι υψηλό (έως 4,50 € ανά λίτρο ισοδύναμο ντίζελ). Το κόστος-στόχος περίπου 1 €/ ανά λίτρο ισοδύναμου ντίζελ φαίνεται πιθανό με εισαγωγές από περιοχές με πολύ καλές συνθήκες ηλιακής και αιολικής ενέργειας. Το αναφερόμενο κόστος-στόχος περιλαμβάνει την εξόρυξη CO₂ από τον αέρα του περιβάλλοντος.

Ωστόσο, το μελλοντικό κόστος καυσίμου αναμένεται επίσης να αυξηθεί για όλες τις άλλες παραλλαγές καθαρών μεταφορών με βάση το υψηλό μερίδιο της ανανεώσιμης ενέργειας που απαιτείται, οδηγώντας σε μείωση της διαφοράς κόστους των καθαρών καυσίμων κατά τη σύγκριση κινητήρων καύσης και ηλεκτρικών κινητήρων (Siegemund, Schmidt, & Trommler, 2017).

Δεδομένου ότι οι διεργασίες PtoF, στα ηλεκτροκαύσιμα, απαιτούν υδρογόνο που παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιώντας ενέργεια χωρίς άνθρακα ως βασικό φορέα ενέργειας, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο πιο σχετικός παράγοντας κόστους για την παραγωγή PtoF, αντιπροσωπεύοντας περισσότερο από το 50% του κόστους παραγωγής. (THE ROYAL SOCIETY, 2019)

| Καύσιμο | Εκτιμώμενες μελλοντικές τιμές |
|---------------------------------|--|
| Ανανεώσιμο Υδρογόνο | Μέχρι το 2030, εκτιμάται ότι θα κοστίζει 1.000 έως 2.000 USD ανά τόνο ισοδύναμου πετρελαίου (toe), |
| Υγροποιημένο Βιοαέριο (Μεθάνιο) | 1.500 έως 2.500 USD ανά toe |
| Συνθετικό Ντίζελ | 1.700 έως 2.700 USD ανά toe |
| Συνθετική Μεθανόλη | 1.700 έως 2.500 USD ανά toe |
| MGO (τρέχων κόστος) | Είναι περίπου 650 έως 700 USD ανά τόνο (Οκτώβριος / Νοέμβριος 2018). Ιστορικά, η τιμή MGO έφτασε τα 1.200 USD ανά τόνο το 2008 και κυμάνθηκε μεταξύ 900 και 1.000 USD ανά τόνο μεταξύ 2011 και 2013. |
| Αμμωνία (βάση ISTEP - 2017) | 1.800 έως 2.300 USD ανά τόνο ισοδύναμου μαζούτ σε ένα σενάριο χαμηλής έναντι υψηλών τιμών για το 2030, υποθέτοντας τη διαθεσιμότητα τεχνολογίας. |

Γράφημα 3 Καύσιμα και εκτιμώμενες μελλοντικές τιμές

(Πηγή: (Brynolf, Taljegard, Grahn, & Hansson, 2018), (Hansson, Mansson, Brynolf, & Grahn, 2019))

4.3.1 Ενεργειακή πυκνότητα και αποθήκευση

Εκτός από το κόστος παραγωγής καυσίμων, οι ιδιότητες ενεργειακής πυκνότητας είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που καθορίζει τη βιωσιμότητα των διαφορετικών επιλογών για κάθε δεδομένο τύπο πλοίου. Ενώ η ενέργεια του υδρογόνου είναι σχεδόν 3 φορές υψηλότερη από αυτή των MGO, όσον αφορά την ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου το καθαρό υδρογόνο έχει σημαντικά χειρότερες ιδιότητες από τα υπόλοιπα καύσιμα.

Με ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα περίπου 0,81 kWh/l, ένα κυβικό μέτρο υδρογόνου που συμπιέζεται στα 350 bar αποδίδει 12 φορές λιγότερη ενέργεια από συγκρίσιμο όγκο MGO και 7 φορές λιγότερη από το LNG. Ένα κυβικό μέτρο υγρού υδρογόνου αποδίδει πάνω από 4 φορές λιγότερη ενέργεια από το MGO και 2,5 φορές λιγότερη από το LNG. Στην περίπτωση του LOHC, ενώ η ογκομετρική του ενεργειακή πυκνότητα είναι υψηλότερη από το υδρογόνο στα 350 bar, η ειδική του ενέργεια είναι χαμηλότερη από αυτή όλων των άλλων καυσίμων (Interegg North-West Europe H2SHIPS, 2022).

Ωστόσο, μόνο η εξέταση της ενεργειακής πυκνότητας των διαφόρων καυσίμων δεν δίνει την πλήρη εικόνα.

Για παράδειγμα, το συμπιεσμένο υδρογόνο αποθηκεύεται συνήθως σε κυλινδρικά δοχεία, με σχετικά παχιά τοιχώματα, που απαιτούνται για να αντέξουν την υψηλή πίεση, προσθέτοντας περίπου 20% στον όγκο του καυσίμου. Εάν σκεφτόταν κανείς να αποθηκεύσει συμπιεσμένο υδρογόνο σε δοχεία 40 ποδιών, τότε ο χώρος που χάνεται ανάμεσα σε πολλαπλά δοχεία καθώς και το ίδιο το πλαίσιο του δοχείου θα πρόσθεταν περαιτέρω απαιτήσεις χώρου.

Στην περίπτωση καυσίμων όπως το LH₂ ή το NH₃ ή το CH₃OH, οι δεξαμενές έχουν γενικά σχεδιασμό διπλού κύτους, με κενό μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού δοχείου. Εκτός αυτού, οι δεξαμενές σπάνια γεμίζουν πλήρως έτσι ώστε να αφήσουν χώρο για το αέριο που παράγεται από την καύση. (Interegg North-West Europe H2SHIPS, 2022)

Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν επίσης οφέλη από τη χρήση κυψελών καυσίμου. Πρώτον, οι ίδιες οι κυψέλες καυσίμου καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο από ένα σύστημα εσωτερικής καύσης συγκρίσιμης ισχύος. Επιπλέον, η χρήση εναλλακτικών καυσίμων σε συνδυασμό με κυψέλες καυσίμου επιτρέπει την εξάλειψη του συστήματος επεξεργασίας καυσαερίων, το οποίο μπορεί να ελευθερώσει σημαντικό χώρο. Οι κυψέλες καυσίμου είναι επίσης πιο ενεργειακά αποδοτικές από ένα σύστημα εσωτερικής καύσης, καθιστώντας δυνατή τη μεταφορά λιγότερων καυσίμων επί του σκάφους. Αυτή η επίδραση θα ενισχυόταν περαιτέρω από το γεγονός ότι η απόδοση των κυψελών καυσίμου αυξάνεται σε μερικό φορτίο. (Interegg North-West Europe H2SHIPS, 2022)

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα προηγούμενα ο ακριβής αντίκτυπος της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων σε κάθε πλοίο θα χρειαζόταν προσεκτική εξέταση κατά περίπτωση. Για τους σκοπούς αυτής της ανάλυσης, ωστόσο εφαρμόστηκαν πολλές γενικές παραδοχές για να ληφθούν υπόψη οι διαφορετικές απαιτήσεις διαφόρων τεχνολογιών όσον αφορά το σύστημα αποθήκευσης καυσίμου και το ενεργειακό σύστημα.

Σε ορισμένες περιπτώσεις οι απαιτήσεις πρόσθετου χώρου είναι αρκετά σημαντικές. Για το LOHC αν και η ενεργειακή πυκνότητα του ίδιου του καυσίμου είναι υψηλότερη από εκείνη του συμπιεσμένου υδρογόνου στα 350 bar, λαμβάνοντας υπόψη την πρόσθετη δεξαμενή αποθήκευσης για αφυδρογονωμένο υγρό καθώς και χώρο για το σύστημα αφυδρογόνωσης, οι τελικές απαιτήσεις χώρου είναι στην πραγματικότητα όχι πολύ καλύτερες από αυτές του συμπιεσμένου υδρογόνου. Από την άλλη πλευρά, όταν

συνδυάζεται το LOHC με ένα SOFC, το οποίο επιτρέπει τη δυνατότητα χρήσης της απόβλητης θερμότητας των κυψελών καυσίμου για τη διατήρηση της διαδικασίας αφυδρογόνωσης, οι συνολικές απαιτήσεις χώρου για ένα σύστημα που βασίζεται σε LOHC μειώνονται σημαντικά.

Λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα, είναι σαφές ότι για όλες τις επιλογές η μετάβαση σε εναλλακτικά καύσιμα θα απαιτήσει περισσότερο χώρο για τα συστήματα καυσίμου και ενέργειας. Αυτό όχι μόνο θα μεταφραστεί σε επιπλέον κόστος δεξαμενών αποθήκευσης και επιπλέον εξοπλισμού, αλλά θα επηρεάσει επίσης την ικανότητα του πλοίου να μεταφέρει επιβάτες ή/και φορτίο.

Κατά συνέπεια, ο οικονομικός αντίκτυπος της αποθήκευσης καυσίμου στο συνολικό κόστος ιδιοκτησίας διαφόρων τύπων πλοίων διαφέρει επίσης δραματικά - ειδικά αν εξεταστεί όχι μόνο το κόστος εξοπλισμού και δεξαμενών αλλά και η οικονομική αξία χαμένων εσόδων. (Interegg North-West Europe H2SHIPS, 2022)

4.4 Συγκριτική αξιολόγηση ανανεώσιμων ναυτιλιακών καυσίμων

Ο ναυτιλιακός τομέας περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων χρήσης, με τις απαιτήσεις ισχύος και την αποθήκευση καυσίμων επί των πλοίων να διαφέρουν κατά πολλαπλές τάξεις μεγέθους. Αυτό υπογραμμίζει τη σημασία του καθορισμού διαφορετικών στρατηγικών για πρόωση μηδενικών εκπομπών για κάθε τύπο σκάφους. Στη συνέχεια, γίνεται σύγκριση για δύο διαφορετικές περιπτώσεις πλοίων.

- Επιβατηγό πλοίο - με χαμηλές απαιτήσεις ενέργειας όσο και με πολλές ευκαιρίες ανεφοδιασμού, με αποτέλεσμα χαμηλή ζήτηση αποθήκευσης ενέργειας επί του σκάφους.
- Δεξαμενόπλοια - μεγάλα πλοία με σημαντικές απαιτήσεις σε ισχύ, πραγματοποιούν μεγάλες διαδρομές με ελάχιστες δυνατότητες ανεφοδιασμού.

Καθώς οι τεχνολογίες πρόωσης προηγμένων εναλλακτικών καυσίμων βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο, τα δεδομένα αντλήθηκαν από οικονομικές μελέτες περιπτώσεων, οι οποίες αναφέρονται σε πλοία διαφορετικών χωρητικοτήτων και δυνατοτήτων ταξιδιού και προσαρμόστηκαν για γίνει η σύγκρισή τους ως προς το μέσο κόστος εφαρμογής τους.

4.4.1 Εργαλεία αξιολόγησης επενδύσεων

- Καθαρά Παρούσα Αξία

Μια παραγωγική μονάδα πρέπει συνήθως να λάβει μια απόφαση από μια περιορισμένη δεξαμενή επενδύσεων, τόσο στις θαλάσσιες μεταφορές όσο και ευρύτερα. Κάθε επένδυση έχει ένα μοναδικό μοτίβο εσόδων και εξόδων με την πάροδο του χρόνου.

Το ποσό της καθαρής παρούσας αξίας (ΚΠΑ) μιας επένδυσης σε ένα συγκεκριμένο προεξοφλητικό επιτόκιο είναι ο πρώτος και συνηθέστερος κανόνας για την επιλογή της πραγματοποίησης μιας επένδυσης. Για την εφαρμογή αυτού του κριτηρίου πρέπει να υπολογιστεί η ΚΠΑ των προβλεπόμενων καθαρών ροών, συμπεριλαμβανομένου του αρχικού κόστους της επένδυσης. Η καθαρή παρούσα αξία (ΚΠΑ) είναι η αξία που προκύπτει από την προεξόφληση των καθαρών ταμειακών ροών στο παρόν, για κάθε έτος

χωριστά, με τη χρήση του προεξοφλητικού επιτοκίου. Όταν αναφερόμαστε στον όρο καθαρά παρούσα αξία εννοούμε το σταθμισμένο άθροισμα :

$$\text{ΚΠΑ (NPV)} = \sum_{t=0}^N \frac{(E\Sigma_t - E\Xi_t)}{\prod_{t=0}^t (1 + i_t)^n}$$

Όπου :

$E\Sigma_t$: τα έσοδα της επένδυσης τη χρονική περίοδο t

$E\Xi_t$: τα έξοδα της επένδυσης τη χρονική περίοδο t

i_t : το επιτόκιο αναγωγής τη χρονική περίοδο t

N : η χρονική διάρκεια ζωής της επένδυσης

Μια κρίσιμη έννοια για τον υπολογισμό της ΚΠΑ είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο, το οποίο είναι επίσης γνωστό ως κόστος κεφαλαίου της παραγωγικής μονάδας. Πρόκειται για το κόστος κεφαλαίου στο απλούστερο σενάριο όπου η μονάδα δανείζεται και δανείζεται με επιτόκια i_t μεταξύ t-1 και t.

Σύμφωνα με το κριτήριο της καθαρής παρούσας αξίας, μια επένδυση είναι κατάλληλη και πρέπει να πραγματοποιηθεί εάν η ΚΠΑ είναι θετική για ένα συγκεκριμένο προεξοφλητικό επιτόκιο. Η επένδυση είναι ακατάλληλη εάν η ΚΠΑ είναι αρνητική. Στην περίπτωση που η ΚΠΑ είναι τελικά μηδενική, δεν είμαστε πεπεισμένοι αν πρέπει να προχωρήσουμε στην επένδυση, διότι δεν θα υπάρξουν καθαρά αποτελέσματα.

Επειδή αποδίδει τη γενική προτίμηση για το παρόν και μετατρέπει τις μελλοντικές ροές αξίας του επενδυτικού σχεδίου σε τρέχουσες αξίες, η ΚΠΑ είναι μια πιο συμφέρουσα προσέγγιση αποτίμησης. (ΘΕΟΦΑΝΙΔΗΣ, 1985)

4.4.2 Ανάλυση δεδομένων

Στο ακόλουθο κεφάλαιο θα γίνει μία εκτενής παρουσίαση των δεδομένων που λήφθηκαν από τις διάφορες μελέτες περιπτώσεων με σκοπό την βέλτιστη κατανόηση αυτών από τον αναγνώστη.

- Δεδομένα Μελετών Περιπτώσεων
 - ο Επιβατηγά πλοία

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται αναλυτικά τα έξοδα των επιβατηγών πλοίων για κάθε εγκατάσταση πρόωσης προηγμένου καυσίμου, όπως λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία:

| Hydrogen Fuelled Ferry | | | |
|-------------------------------|---------------------------|----------|-------|
| CAPEX | Κυψέλες Καυσίμων | 2200 | \$/kW |
| | Κόστος Διαχείρισης Έργου | 478.315 | \$/kW |
| | Γάστρα Πλοίου | 4532.049 | \$/kW |
| | Μηχανισμός Έλικας | 1056.765 | \$/kW |
| | Ηλεκτρολογικός Εξοπλισμός | 2932.987 | \$/kW |
| | Σύστημα Πλοήγησης | 1147.804 | \$/kW |
| | Βοηθητικά Μηχανήματα | 3280.704 | \$/kW |
| | Υπερκατασκευή | 6893.057 | \$/kW |
| | Εξοπλισμός LH2 | 5837.561 | \$/kW |
| | Τεχνικό Κόστος | 1519.973 | \$/kW |
| | Κατασκευαστικό Κόστος | 1704.913 | \$/kW |
| | ΑΘΡΟΙΣΜΑ | 31584.13 | \$/kW |
| OPEX | Συντήρηση | 2772 | \$/kW |
| | Κόστος Καυσίμου | 861.4 | \$/kW |
| | ΑΘΡΟΙΣΜΑ | 3633.4 | \$/kW |

Πίνακας 4.1 Επιμερισμένα έξοδα επιβατηγού πλοίου με εγκατάσταση πρόωσης με καύσιμο υδρογόνο (Pratt & Klebanoff, 2018)

| Methanol Fuelled Ferry | | | |
|-------------------------------|-----------------------|------|-------|
| CAPEX | Πλοίο με κύρια μηχανή | 815 | \$/kW |
| | ΑΘΡΟΙΣΜΑ | 815 | \$/kW |
| OPEX | Καύσιμο | 600 | \$/kW |
| | Συντήρηση | 22 | \$/kW |
| | ΑΘΡΟΙΣΜΑ | 1415 | \$/kW |

Πίνακας 4.2 Επιμερισμένα έξοδα επιβατηγού πλοίου με εγκατάσταση πρόωσης με καύσιμο μεθανόλη (Ellis & Tanneberger, 2016)

| Ammonia Fuelled Ferry | | | |
|------------------------------|---|---------|-------|
| CAPEX | Design | 180 | \$/kW |
| | Σύστημα Fuel Cells άμεσου ψεκασμού αμμωνίας | 750 | \$/kW |
| | Θεώρηση διπλής μηχανής για πρόωση | 570 | \$/kW |
| | Κόστος Εγκατάστασης Αποθήκευσης Καυσίμου | 6.72 | \$/kW |
| | ΑΘΡΟΙΣΜΑ | 9429.90 | \$/kW |
| OPEX | Λειτουργικές Δαπάνες | 1399.07 | \$/kW |
| | ΑΘΡΟΙΣΜΑ | 1399.07 | \$/kW |

Πίνακας 4.3 Επιμερισμένα έξοδα επιβατηγού πλοίου με εγκατάσταση πρόωσης με καύσιμο αμμωνία (Verbruggen, 2018) (Madsen, 2011)

ο Δεξαμενόπλοια

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται αναλυτικά τα έξοδα των δεξαμενόπλοιων για κάθε εγκατάσταση πρόωσης προηγμένου καυσίμου, όπως λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία:

| Hydrogen Fuelled Tanker | | | |
|--------------------------------|--|---------|-------|
| CAPEX | Πλοίο χωρίς κύρια μηχανή | 2735.20 | \$/kW |
| | Αεριοστρόβιλος | 530 | \$/kW |
| | Σύστημα ηλεκτροπρόωσης | 1935.48 | \$/kW |
| | Μηχανολογικός εξοπλισμός πλοίου για αποθήκευση υδρογόνου | 3053.44 | \$/kW |
| | Εξοπλισμός αμπαριών για αποθήκευση υδρογόνου | 5.37 | \$/kW |
| | ΑΘΡΟΙΣΜΑ | 8259.49 | \$/kW |
| OPEX | Κόστος Καυσίμου | 1514.31 | \$/kW |
| | Πλήρωμα | 445.80 | \$/kW |
| | Συντήρηση | 43 | \$/kW |
| | ΑΘΡΟΙΣΜΑ | 2003.11 | \$/kW |

Πίνακας 4.4 Επιμερισμένα έξοδα δεξαμενόπλοιου με εγκατάσταση πρόωσης με καύσιμο υδρογόνο (Alkhaledi, Sampath, & Pilidis, 2022)

| Methanol Fuelled Tanker | | | |
|--------------------------------|-----------------------|-----|-------|
| CAPEX | Πλοίο με κύρια μηχανή | 815 | \$/kW |
| | ΑΘΡΟΙΣΜΑ | 815 | \$/kW |
| OPEX | Κόστος Καυσίμου | 760 | \$/kW |
| | Συντήρηση | 24 | \$/kW |
| | ΑΘΡΟΙΣΜΑ | 784 | \$/kW |

Πίνακας 4.5 Επιμερισμένα έξοδα δεξαμενόπλοιου με εγκατάσταση πρόωσης με καύσιμο μεθανόλης (Ellis & Tanneberger, 2016)

| Ammonia Fuelled Tanker | | | |
|-------------------------------|----------------------------|---------|-------|
| CAPEX | Πλοίο με μηχανή | 4425 | \$/kW |
| | Κόστος δεξαμενών bunkering | 137.02 | \$/kW |
| | ΑΘΡΟΙΣΜΑ | 4562.02 | \$/kW |
| OPEX | Κόστος καυσίμου | 1229.75 | \$/kW |
| | Συντήρηση | 225.59 | \$/kW |
| | ΑΘΡΟΙΣΜΑ | 1455.34 | \$/kW |

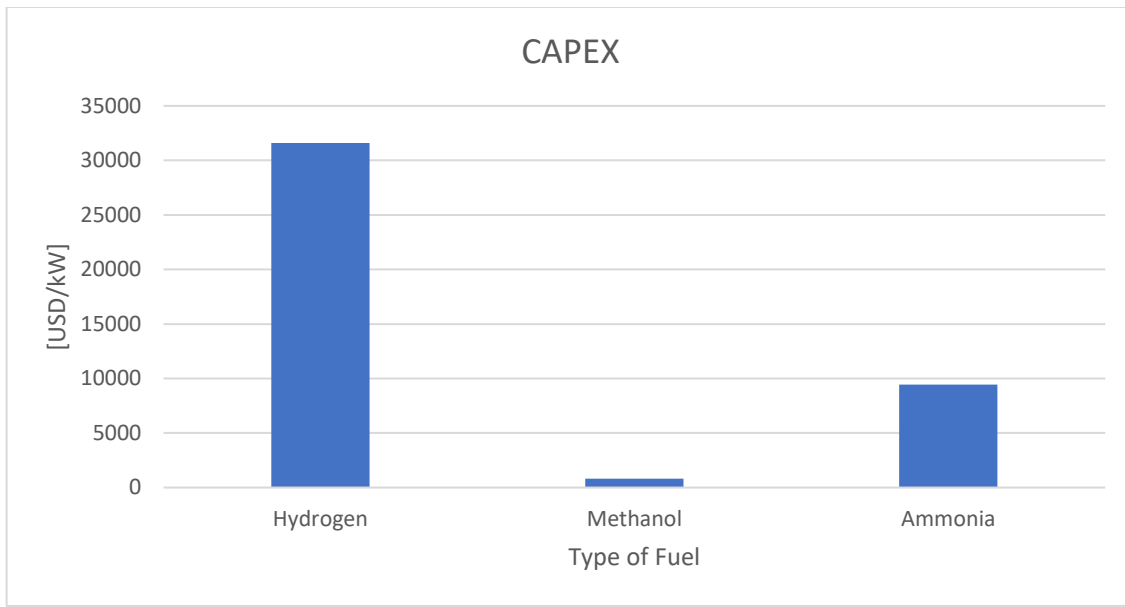
Πίνακας 4.6 Επιμερισμένα έξοδα δεξαμενόπλοιου με εγκατάσταση πρόωσης με καύσιμο αμμωνίας (Youngkyun & Seongjong , 2021)

- Κόστος Επένδυσης

Το κεφαλαιουχικό κόστος ενός πλοίου αποτελείται από όλες τις δαπάνες από τη στιγμή που ναυπηγείται ένα πλοίο. Αποτελούν υποχρεώσεις, οι οποίες δεν επηρεάζουν άμεσα τη φυσική και εμπορική λειτουργία του πλοίου. Συνήθως αποτελούν το 42% του συνολικού κόστους ιδιοκτησίας ενός πλοίου, όμως έχουν διαφορετικό χαρακτήρα από τα υπόλοιπα κόστη.

- Επιβατηγά Πλοία

Στη μελέτη των επιβατηγών πλοίων η περισσότερο κοστοβόρα εγκατάσταση είναι αυτή του υδρογόνου. Το μεγάλο κόστος οφείλεται στο κόστος των κυψελών καυσίμου το οποίο ανέρχεται στα 2200 USD ανά kW.

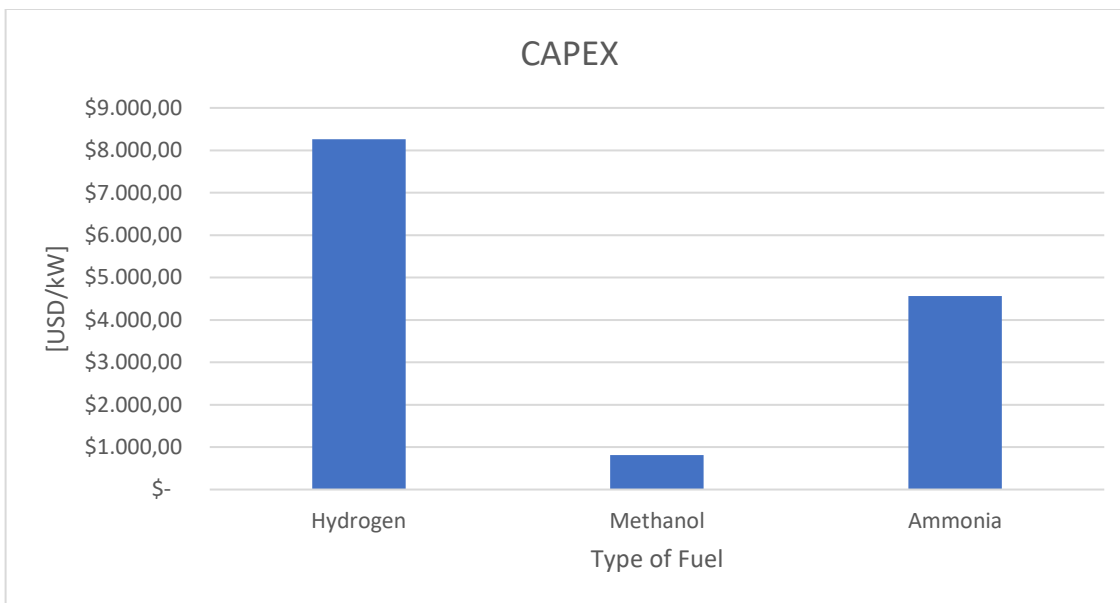


Πίνακας 4.7 Κεφαλαιουχικά κόστη επιβατηγών πλοίων σε USD/kW ανάλογα με τον τύπο καυσίμου

Το μικρότερο κόστος παρατηρείται στην εγκατάσταση μεθανόλης, καθώς το κύριο έξοδο, πέραν του κόστους κατασκευής του σκάφους, είναι η εγκατάσταση της κύριας μηχανής.

- Δεξαμενόπλοια

Όπως και στη μελέτη των επιβατηγών, τα αποτελέσματα δεν διαφοροποιούνται. Το υδρογόνο αποτελεί την πιο δαπανηρή εγκατάσταση, καθώς μόνο η εγκατάσταση αποθήκευσης κοστίζει 3053,44 USD ανά kW.



Πίνακας 4.8 Κεφαλαιουχικά κόστη δεξαμενόπλοιων σε USD/kW ανάλογα με τον τύπο καυσίμου

Το μικρότερο κόστος ανά kW ισχύος της εγκατεστημένης ισχύος παρατηρείται, όπως προηγουμένως, στην εγκατάσταση της μεθανόλης, αποτελώντας την οικονομικότερη λύση όσον αφορά τις κεφαλαιουχικές δαπάνες.

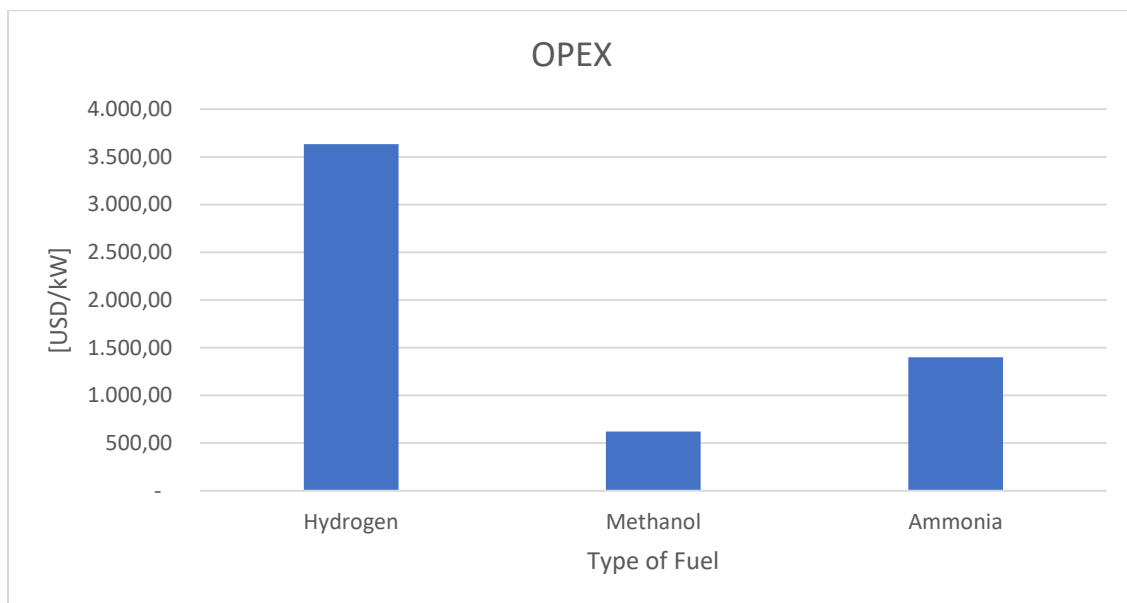
- Λειτουργικό Κόστος

Το λειτουργικό κόστος ενός πλοίου περιλαμβάνει τις δαπάνες για την καθημερινή λειτουργία του. Κόστη όπως οι μισθοί του πληρώματος, οι προμήθειες και οι συντηρήσεις που λαμβάνουν χώρα ανεξάρτητα των εμπορικών δραστηριοτήτων στις οποίες μπορεί να εμπλέκεται το πλοίο. Σε αυτά προστίθενται και τα κόστη των ταξιδιών, τα οποία είναι μεταβλητά έξοδα και περιλαμβάνουν τα καύσιμα, τα λιμενικά τέλη, τα τέλη διέλευσης.

Όπως προαναφέραμε, δεδομένου ότι κάθε πλοίο έχει διαφορετική χωρητικότητα ωφέλιμου φορτίου και δρομολογίων, είναι δύσκολο να συγκριθούν τα πλοία. Σε αυτή την ανάλυση το λειτουργικό κόστος για κάθε πλοίο εκφράζεται σε δολάρια (USD) ανά μονάδα ισχύος (kW).

- Επιβατηγά Πλοία

Στην ανάλυση των επιβατηγών πλοίων όπως φαίνεται στο παρακάτω γράφημα η πιο οικονομική επιλογή είναι η μεθανόλη, όσον αφορά το λειτουργικό κόστος. Αυτό οφείλεται στο χαμηλό κόστος της ως καύσιμο, το οποίο ανέρχεται στα 600 USD ανά kW.

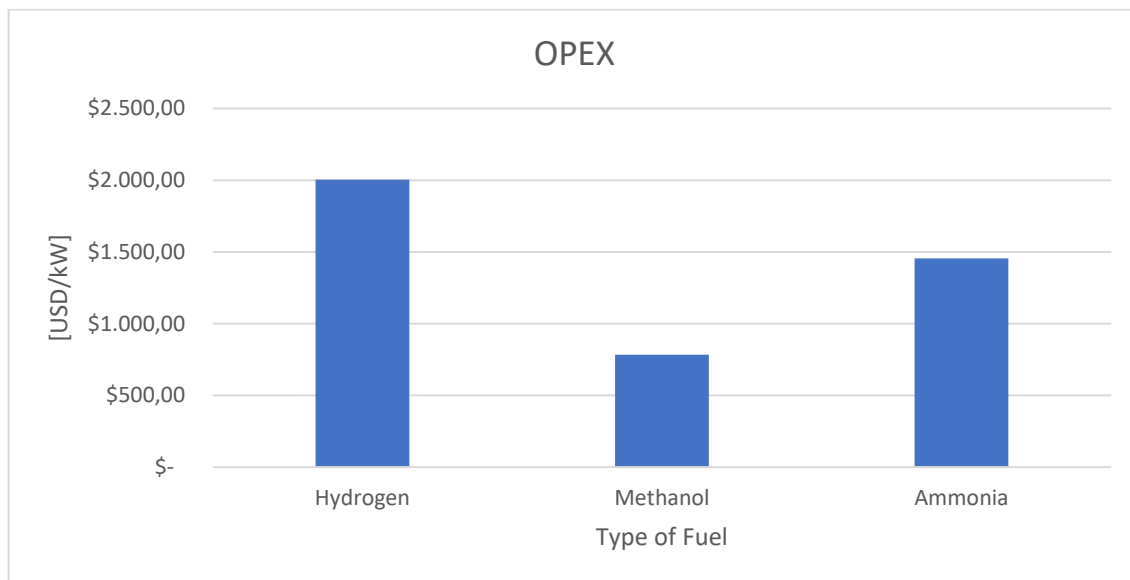


Πίνακας 4.9 Λειτουργικά κόστη επιβατηγών πλοίων σε USD/kWh ανάλογα με τον τύπο καυσίμου

Η μεγάλη διαφορά που παρατηρείται μεταξύ της τιμής του υδρογόνου σε σχέση με τα άλλα δύο εναλλακτικά καύσιμα, οφείλεται στο γεγονός ότι το κόστος για την επισκευή και τη συντήρηση μίας εγκατάστασης κυψελών καυσίμου με καύσιμο υδρογόνο είναι 2772 USD ανά kW. Αντίθετα, η μεθανόλη έχει το μικρότερο κόστος επισκευής και συντήρησης, καθώς η εφαρμογή της γίνεται σε κινητήρες διπλού καυσίμου, των οποίων οι αρχές είναι ήδη γνωστές από τη χρήση τους σε πλοία με καύσιμο LNG.

- ο Δεξαμενόπλοια

Στην ανάλυση των δεξαμενόπλοιων η πιο οικονομική επιλογή είναι η μεθανόλη. Το λειτουργικό κόστος της αμμωνίας και του υδρογόνου φαίνεται να έχουν μικρή διαφορά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το κόστος συντήρησης είναι υψηλό και για τα δύο καύσιμα, της αμμωνίας στα 225,59 USD/kW και του υδρογόνου στα 488,8 USD/kW, σε αντίθεση με τη μεθανόλη που είναι 24 USD/kW.



Πίνακας 4.10 Λειτουργικά κόστη δεξαμενόπλοιων σε USD/kW ανάλογα με τον τύπο καυσίμου

Το κόστος παρουσιάζει αλλαγές στην εκτίμηση σε σχέση με την ανάλυση των επιβατηγών πλοίων. Το υδρογόνο έχει την μεγαλύτερη κατανάλωση στα 1514,31 USD/kW, ακολουθεί η αμμωνία στα 1229,75 USD/kW και τέλος οικονομικότερη λύση είναι η μεθανόλη στα 760 USD/kW.

4.4.3 Αποτελέσματα σύγκρισης μέσω του κριτηρίου ΚΠΑ

- Επιβατηγά Πλοία

Μετά τη συγκέντρωση των παραπάνω στοιχείων από τις μελέτες περίπτωσης, παρακάτω παρουσιάζονται οι ταμειακές ροές για έναν ολοκληρωμένο κύκλο ζωής των πλοίων, δηλαδή για 20 έτη. Ως προεξοφλητικό επιτόκιο θεωρήθηκε 3% (Korberg A. D., Brynolf, Grahn, & Skon, 2021) και ο πληθωρισμός λήφθηκε 1%.

| | NPV |
|------------------------|-----------|
| Hydrogen Fuelled Ferry | -90266.96 |
| Methanol Fuelled Ferry | -10704.84 |
| Ammonia Fuelled Ferry | -39288.61 |

Πίνακας 4.11 Καθαρά παρούσα αξία επιβατηγών πλοίων

Οι τιμές του κριτηρίου NPV είναι αρνητικές καθώς τα στοιχεία για τα έσοδα, όπου στα επιβατηγά πλοία είναι οι ναύλοι, δεν ήταν διαθέσιμα. Επομένως, προτιμάται η επένδυση με τη μικρότερη ΚΠΑ, όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι το επιβατηγό πλοίο με εγκατάσταση μεθανόλης. Τόσο το κόστος της επένδυσης όσο και τα λειτουργικά έξοδα είναι μικρότερης κλίμακας σε σχέση με τις άλλες δύο επιλογές. Η λιγότερο συμφέρουσα επένδυση είναι η εγκατάσταση μηχανισμού πρόωσης με χρήση υδρογόνου. Με την υπάρχουσα τεχνολογία, το κόστος των δεξαμενών αποθήκευσης και των κυψελών καυσίμου είναι τεράστιο σε σχέση με την εγκατάσταση πρόωσης με χρήση αμμωνίας ή μεθανόλης.

- Δεξαμενόπλοια

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, έτσι και εδώ ως κύκλο ζωής των πλοίων ορίστηκαν τα 20 έτη, το επιτόκιο προεξόφλησης 3% και ο πληθωρισμός 1%.

| | NPV |
|--------------------------------|--------------|
| Hydrogen Fuelled Tanker | -39,696.03 € |
| Methanol Fuelled Tanker | -12,680.24 € |
| Ammonia Fuelled Tanker | -35,883.93 € |

Πίνακας 4.12 Καθαρά παρούσα αξία δεξαμενόπλοιων

Και στην περίπτωση των δεξαμενόπλοιων παρατηρείται ότι η εγκατάσταση πρόωσης με χρήση ως καύσιμο μεθανόλη είναι η οικονομικότερη επένδυση. Όσον αφορά την καθαρά παρούσα αξία της αμμωνίας και του υδρογόνου παρατηρείται μικρότερη διαφορά ανάμεσά τους, όμως αυτό δεν υπερκαλύπτει την τεράστια απόκλιση που έχουν σε σχέση με την εγκατάσταση μεθανόλης.

4.5 Επένδυση στη ναυτιλακή αγορά

4.5.1 Ανάλυση Ευαισθησίας

Ένα από τα πιο δύσκολα σημεία της ανάλυσης των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των επενδυτικών σχεδίων και των προτάσεων πολιτικής είναι η ενσωμάτωση των ιδεών του κινδύνου και της αβεβαιότητας στην ανάλυση κόστους-οφέλους. Η προσεκτική ανάλυση έχει το πλεονέκτημα ότι επιτρέπει την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του έργου σε περίπτωση που ορισμένες από τις υποκείμενες παραδοχές της μελέτης δεν επαληθευτούν στην πραγματικότητα. Η μελέτη ευαισθησίας επικεντρώνεται στην εξέταση αυτού του σεναρίου "τι θα γινόταν αν".

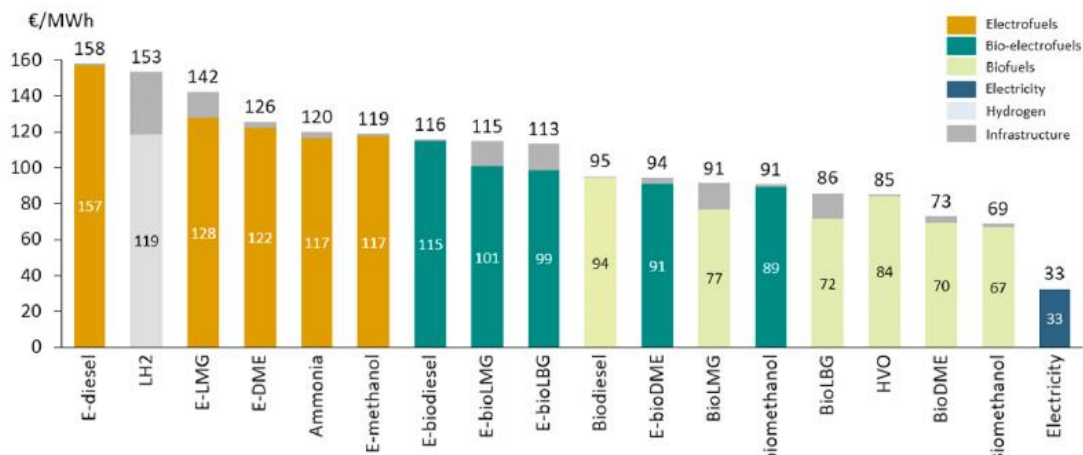
Κατά συνέπεια, υπάρχει οικονομικός κίνδυνος για τα επενδυμένα κεφάλαια υπό αβέβαιες συνθήκες. Η διακύμανση ή η τυπική απόκλιση των αποδόσεων των επενδύσεων χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει αυτόν τον κίνδυνο.

Για την αντιμετώπιση του ζητήματος της αβεβαιότητας και του κινδύνου εισάγεται η έννοια της ανάλυσης ευαισθησίας. Η ανάλυση ευαισθησίας υπάρχει για να προβλέψει εάν το αποτέλεσμα της επένδυσης που μελετάμε είναι σωστό εάν η κατάσταση διαφέρει από την αρχική πρόβλεψη. Είναι μια από τις πιο σημαντικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση επενδυτικών αποφάσεων.

4.5.2 Κόστος Καυσίμου

Οι αστάθμητοι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας και της βιομάζας, του σχεδιασμού των εγκαταστάσεων, τα επενδυτικά έξοδα ή την απόδοση του ηλεκτρολύτη ενδέχεται να προκαλέσουν διακυμάνσεις στις τιμές των καυσίμων που εμφανίζονται στην παρούσα μελέτη.

Σύμφωνα με τη μελέτη των Korberg, Brynolf, Grahn και Skov το κόστος καυσίμου απέδωσε ένα ευρύ φάσμα τιμών για τα καύσιμα που εξετάστηκαν, με το κόστος για την ηλεκτρική ενέργεια να κυμαίνεται από 33 €/MWh έως 158 €/MWh στο βασικό σενάριο. Με ορισμένες εξαιρέσεις, το Σχήμα 4.1 δείχνει ένα διαχωρισμό στις κατηγορίες των βιοκαυσίμων, των βιο-ηλεκτροκαυσίμων και των ηλεκτροκαυσίμων, με τα πρώτα να έχουν το χαμηλότερο κόστος και τα δεύτερα το μεγαλύτερο. Τα καύσιμα ντίζελ είναι τα πιο ακριβά σε όλους τους τύπους καυσίμων, ενώ τα καύσιμα μεθανόλης είναι τα φθηνότερα. Επιπλέον, το Σχήμα 4.1 καταδεικνύει ότι όταν είναι απαραίτητη η κρυογενική αποθήκευση, οι δαπάνες υποδομής αντιπροσωπεύουν μεγαλύτερο μέρος του κόστους καυσίμου. Το κόστος υποδομής κυμαίνεται μεταξύ 10 και 17% ανάλογα με την πορεία παραγωγής καυσίμου για LMG και LBG, ενώ αντιπροσωπεύει το 23% του τελικού κόστους καυσίμου για LH2. (Korberg D. A., Brynolf, Grahn, & Skov, 2021)



Σχήμα 4.1 Ανάλυση κόστους καυσίμων (Korberg D. A., Brynolf, Grahn, & Skov, 2021)

Η τιμή του βιοκαυσίμου κυμαίνεται μεταξύ 69 και 95 €/MWh. Για τα βιοκαύσιμα που παράγονται από ξηρή βιομάζα, η πρώτη ύλη αντιπροσωπεύει το 35-50% του τελικού κόστους του καυσίμου, ή περίπου 25% στην περίπτωση του LBG και 65% στην περίπτωση του HVO, το οποίο χρησιμοποιεί ακριβότερα λιπαρά έλαια. Η μονάδα βιοαερίου αντιπροσωπεύει περισσότερο από το 35% του κόστους του καυσίμου στο bioLBG, καθιστώντας το σημαντικότερο στοιχείο κόστους. (Korberg D. A., Brynolf, Grahn, & Skov, 2021)

Λόγω της προσθήκης υδρογόνου από ηλεκτρολύτες, τα βιο-ηλεκτροκαύσιμα κοστίζουν συνήθως μεταξύ 91 και 119 €/MWh, υψηλότερα από τα βιοκαύσιμα. Οι συνολικές αποδόσεις μετατροπής εισροών-εκροών είναι συγκρίσιμες με εκείνες των βιοκαυσίμων, αλλά μια βασική διαφορά από τα βιοκαύσιμα είναι ότι απαιτείται λιγότερη βιομάζα για την παροχή των ίδιων αποδόσεων. Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του κόστους αυτών των καυσίμων, αντιπροσωπεύοντας το 25-35% του συνολικού κόστους. Οι ηλεκτρολύτες και η αποθήκευση υδρογόνου έρχονται στη δεύτερη θέση, αντιπροσωπεύοντας το 15-25% του συνόλου, ενώ η βιομάζα καλύπτει το υπόλοιπο 15-20%. (Korberg D. A., Brynolf, Grahn, & Skov, 2021)

Στην παρούσα έρευνα, τα ηλεκτροκαύσιμα και το υδρογόνο έχουν το μεγαλύτερο κόστος, το οποίο κυμαίνεται από 120 έως 158 €/MWh. Το κόστος παραγωγής οποιουδήποτε ηλεκτροκαυσίμου περιλαμβάνει το 45-55% του κόστους της ενέργειας. Το κόστος των ηλεκτρολυτών και της αποθήκευσης υδρογόνου είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος παράγοντας κόστους, που αντιπροσωπεύει το 25-35% του κόστους του καυσίμου. Το υπόλοιπο μέρος αποτελείται από την υποδομή, τους αντιδραστήρες σύνθεσης καυσίμου, την υγροποίηση και τη δέσμευση άνθρακα/αζώτου. (Korberg D. A., Brynolf, Grahn, & Skov, 2021)

Για το LH₂, οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας εξακολουθούν να είναι ο μεγαλύτερος παράγοντας κόστους σε ποσοστό 40%, ακολουθούμενος από τα έξοδα του ηλεκτρολύτη και της υποδομής, το καθένα σε ποσοστό 23%. Ένας άλλος σημαντικός συντελεστής των συνολικών δαπανών, με 18%, είναι η υγροποίηση. (Korberg D. A., Brynolf, Grahn, & Skov, 2021)

Κεφάλαιο 5: Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται έξι μελέτες περιπτώσεων για νεότευκτα πλοία, με σκοπό τη μελέτη και σύγκριση των διαφόρων τεχνολογιών πρόωσης με χρήση εναλλακτικών καυσίμων. Παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αρχικά κόστη επένδυσης και τα λειτουργικά έξοδα για κάθε περίπτωση πλοίου και καυσίμου.

Η οικονομική ανάλυση των παραπάνω περιπτώσεων μας έδειξε ότι η μεθανόλη είναι η ανταγωνιστικότερη εκ των τριών καυσίμων (υδρογόνο, μεθανόλη, αμμωνία). Λόγο των διαφορετικών περιοχών λειτουργίας των πλοίων, τα κόστη υπολογίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση, την απόσταση ταξιδιού και το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος, εξού και η αναγωγή του κόστους σε μονάδες ισχύος.

Το κόστος του καυσίμου φαίνεται να επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες που επηρεάζουν τον τρόπο παραγωγής του. Τέτοιοι είναι οι εγκαταστάσεις παραγωγής και το μέσο με το οποίο παράγεται.

Συνοψίζοντας, η διαδικασία εκτίμησης μιας νέας επένδυσης στο τομέα των μεταφορών, πόσο μάλλον με τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων, απαιτεί την κατάστρωση αναλυτικού επενδυτικού σχεδίου, την εξακρίβωση και την εκτίμηση στοιχείων κόστους και ωφελειών, για να προβλέψουμε τις κινήσεις μας, ερμηνεύοντας τα αποτελέσματα που θα μας δώσουν.

Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν να αξιοποιήσει τους τύπους των προηγμένων καυσίμων και των συστημάτων πρόωσης, να συλλέξει τα δεδομένα της αγοράς, και να αξιολογήσει σ' ένα τεχνο - οικονομικό πλαίσιο την αξιοποίηση τους. Όπως γίνεται αντιληπτό από τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν στην παρούσα μελέτη οι τύποι καυσίμων που μέχρι σήμερα έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον για την προώθηση των πλοίων, είναι τα βιοκαύσιμα, το υγραέριο (LPG), το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), η αμμωνία, η μεθανόλη κ.α. Όσον αφορά στο υγροποιημένο φυσικό αέριο, αυτό φαίνεται να είναι ένα βασικό μεταβατικό καύσιμο όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό και από την συνεχώς αυξανόμενη τάση στις παραγγελίες των νέων πλοίων τύπου LNG-ready dual fuel. Μέσα από την ανάλυση των τάσεων της αγοράς παρατηρείται ότι η παγκόσμια ναυτιλία έχει στραφεί σε μεγάλο βαθμό στην αναζήτηση εναλλακτικών καυσίμων και στην χρήση νέων τύπων και προχωρημένων τεχνολογιών.

Ωστόσο όσον αφορά στην αξιοποίηση της χρήσης των καυσίμων αυτών για την πρόωση των πλοίων, εμφανίζονται ορισμένες προκλήσεις που έχουν να κάνουν κυρίως με την αποθήκευσή τους, λόγω της μειωμένης ενεργειακής πυκνότητάς τους συγκριτικά με τα παραδοσιακά καύσιμα. Μία ακόμη πρόκληση που εμφανίζεται, αφορά και στην ανάγκη διατήρησης χαμηλών θερμοκρασιών για την αποθήκευση του τύπου αυτού των καυσίμων. Παράλληλα, ένα ζήτημα που θα πρέπει να επιλυθεί για την αξιοποίηση των προηγμένων αυτών τύπων καυσίμου είναι η εκπαίδευση των πληρωμάτων των πλοίων. Η χρήση των καυσίμων αυτών, αν και περιβαλλοντικά θεωρείται βιώσιμη, δεν είναι το ίδιο ανταγωνιστική συγκριτικά με το LNG προσώρας εφόσον το κόστος τους είναι υψηλότερο και η διαθεσιμότητα του είναι μειωμένη. Επιπροσθέτως, το γεγονός ότι τα βιοκαύσιμα υπάρχει δυνατότητα να αναμιχθούν με άλλα καύσιμα, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η μεθανόλη και το υδρογόνο, έχουν αποτελέσει ιδιαίτερα προηγμένα καύσιμα για την λειτουργία των συστημάτων πρόωσης ενός στα πλεονεκτήματα τους εμπεριέχεται η ευκολία αποθήκευσης εφόσον δεν απαιτεί διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών αλλά και η χαμηλή αναφλεξιμότητας αποφεύγοντας με αυτόν τον τρόπο ορισμένα ζητήματα ασφαλείας.

Μέσω των μελετών τόσο για τα επιβατηγά πλοία, όσο και για τα δεξαμενόπλοια, ανάμεσα στα τρία προαναφερθέντα καύσιμα, η μεθανόλη φαίνεται να έχει το μικρότερο κόστος τόσο σε εγκατάσταση, όσο και σε λειτουργία. Αυτό το αποτέλεσμα, σε συνδυασμό με την τοξικότητα της αμμωνίας και το χαμηλό κόστος παραγωγής της μεθανόλης, δικαιολογεί την τάση της ναυτιλίας στην υιοθέτηση της δεύτερης ως το πλέον εναλλακτικό καύσιμο.

Μελλοντικά, στον τομέα της ναυτιλίας προβλέπεται ότι στους περισσότερους κλάδους θα εφαρμοστούν νέες τεχνολογίες στα πλοία, ωστόσο η υλοποίηση αυτών των τεχνολογιών θα απαιτεί την χρήση μεγάλων κεφαλαίων. Παράλληλα, οι τύποι καυσίμων για τα συστήματα πρόωσης, θα έχουν υψηλότερο κόστος σε σχέση με το πετρέλαιο αλλά θα δημιουργήσουν νέες λύσεις για ολόκληρο τον κλάδο, που θα συνεισφέρουν ιδιαίτερα στην προστασία του περιβάλλοντος.

Βιβλιογραφία

Ελληνική

ΘΕΟΦΑΝΙΔΗΣ, Σ. (1985). *ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΩΝ ΣΧΕΔΙΩΝ*. ΠΑΠΑΖΗΣΗΣ.

ΣΑΜΠΡΑΚΟΣ, Α. Ε. (2013). *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ*. ΙΔΙΩΤΙΚΗ.

Ξενόγλωσση

Abbasov , F. (2019, Οκτώβριος 1). *Transport & Environment*. Ανάκτηση Νοέμβριος 14, 2022, από <https://www.transportenvironment.org/discover/%E2%82%AC24bn-fossil-fuel-subsidies-perverse-incentive-shipping-pollution/>

ABS. (2020). *SUSTAINABILITY WHITEPAPER AMMONIA AS MARINE FUEL*.

ABS. (2021). *SUSTAINABILITY WHITEPAPER : HYDROGEN AS MARINE FUEL*. Ιούνιος.

ABS. (2022). *SUSTAINABILITY WHITE PAPER: LNG AS MARINE FUEL*.

Alkhaledi, A. N., Sampath, S., & Pilidis, P. (2022, Ιούλιος). Economic analysis of a zero-carbon liquefied hydrogen tanker ship. *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.168>

Australian National Training Authority, (. (1997). *Vocational education and training performance*. Brisbane, Queensland: Australian National Training Authority.

Bae, C., & Kim, J. (2016, Οκτώβριος 13). Alternative fuels for internal combustion engines. *Proceedings of the Combustion Institute*.

Britannica, E. (2007). *Britannica Kids*. Ανάκτηση Νοέμβριος 13, 2022, από <https://kids.britannica.com/kids/assembly/view/1386>

- Brynnolf, S., Taljegard, M., Grahn, M., & Hansson, J. (2018). *Electrofuels for the transport sector: A review of production costs*.
- Buhaug, O., Faber, J., & Eyring, V. (2009). *Technical support for European action to reducing GHG emissions*.
- Chevron Corporation. (2021). *2021 performance data*.
- DNV GL. (2019b). *MARITIME FORECAST TO 2050*.
- DNV-GL. (2016). *Methanol as marine fuel: Environmental benefits, technology readiness, and economic feasibility*. DNV-GL.
- Dubravko, M. (2013, Ιούνιος). *Research Gate*. Ανάκτηση Νοέμβριος 13, 2022, από https://www.researchgate.net/publication/310459698_Engine_Monitors_for_General_Aviation_Piston_Engines_Condition_Monitoring
- Ellis, J., & Tanneberger, K. (2016). *Study on the use of ethyl and methyl alcohol as alternative fuels in shipping*. European Maritime Safety Agency (EMSA).
- European Environment Agency. (2019). *European Environment Agency*. Ανάκτηση Νοέμβριος 13, 2022, από [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/atmospheric-concentration-of-carbon-dioxide-4/#tab-chart_5_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_polutant%22%3A%5B%22CH4%20\(ppb\)%22%5D%7D%7D](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/atmospheric-concentration-of-carbon-dioxide-4/#tab-chart_5_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_polutant%22%3A%5B%22CH4%20(ppb)%22%5D%7D%7D)
- Fredrik G. Aarskog a, J. D. (χ.χ.). *Energy and cost analysis of a hydrogen driven high speed passenger ferry*. International Shipbuilding Progress 67.
- Hansson, J., Mansson, S., Brynnolf, S., & Grahn, M. (2019). *Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders*.
- Hsieh, C.-w., & Felby, C. (2017). *Biofuels for the marine shipping sector : An overview and analysis of sector infrastructure, fuel technologies and regulations*. IEA Bioenergy.
- IEA. (2020). *World Energy Outlook*. International Energy Agency.

IMO. (2020). *Fourth Greenhouse Gas Study 2020*.

IMO. (2021). Cutting GHG emissions from shipping - 10 years of mandatory rules. Ανάκτηση από <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/DecadeOfGHGAction.aspx>

Interegg North-West Europe H2SHIPS. (2022). *Comparative report on alternative fuels for ship propulsion*.

ISO. (2017). *ISO 8217 2017 Fuel Standards*.

Jääskeläinen, H. (2022). *Diesel Net*. Ανάκτηση Νοέμβριος 13, 2022, από https://dieseln.net/tech/fuel_ammonia.php

Kayadelen, H. K., & Ust, Y. (2013, Νοέμβριος). *Marine Gas Turbines*. Ανάκτηση Νοέμβριος 14, 2022, από Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/264353036_Marine_Gas_Turbines

Kobayashi, H., Hayakawa, A., Okafor, E. C., & Somarathne, K. D. (2018, Νοέμβριος). *Research Gate*. Ανάκτηση Νοέμβριος 13, 2022, από https://www.researchgate.net/publication/328854439_Science_and_technology_of_ammonia_combustion

Korberg, A. D., Brynolf, S., Grahn, M., & Skov, I. R. (2021). Techno-economic assessment of advanced fuels and propulsion systems in future fossil-free ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110861>

Korberg, D. A., Brynolf, S., Grahn, M., & Skov, I. R. (2021). Techno-economic assessment of advanced fuels and propulsion systems in future fossil-free ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Krajewski, L. J. (χ.χ.). *Operations management :strategy and analysis*.

López, A., Díaz, G., Zubelzu, S., & Álvarez, R. (2015). Analysis of low carbon super credit policy efficiency in European Union greenhouse gas emissions. *Energy*.

- Madsen, R. T. (2011). *144-Car Ferry LNG Fuel Conversion Feasibility Study: Life Cycle Cost Analysis*.
- Menana, H., Billard, J.-Y., Bennabi, N., & Charpentier, J.-F. (2016, Σεπτέμβριος). *Hybrid Propulsion Systems for Small Ships: Context and Challenges*. Ανάκτηση Νοέμβριος 14, 2022, από Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/308779563_Hybrid_Propulsion_Systems_for_Small_Ships_Context_and_Challenges
- MILJKOVIĆ, D. (2013, Ιούνιος). *ENGINE MONITORS for GENERAL AVIATION*. Ανάκτηση Νοέμβριος 13, 2022, από https://www.researchgate.net/publication/310459698_Engine_Monitors_for_General_Aviation_Piston_Engines_Condition_Monitoring
- Mohammed Al-Breiki, Y. B. (2020). *Comparative cost assessment of sustainable energy carriers produced*. ELSEVIER.
- OCHU, E. R., BRAVERMAN, S., SMITH, G., & FRIEDMANN, J. (2021). *HYDROGEN FACT SHEET: PRODUCTION OF LOW-CARBON HYDROGEN*. COLUMBIA | SIPA Center of Global Energy Policy.
- Parsons, C. (1858). *Library of Congress*. Ανάκτηση Νοέμβριος 13, 2022, από <http://hdl.loc.gov/loc.pnp/cph.3b51503>
- Pratt, W. J., & Klebanoff, E. L. (2018). *Optimization of Zero Emission Hydrogen Fuel Cell Ferry Design, With Comparisons to the SF-BREEZE*.
- Publiship. (χ.χ.). *Publiship*. Ανάκτηση Νοέμβριος 13, 2022, από <https://publiship.com/a-look-at-the-environmental-impact-of-bookshipping/>
- Reif, K. (2015). *Gasoline Engine Management : Systems and Compounds*.
- Siegemund, S., Schmidt, P., & Trommler, M. (2017). *The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU*.
- Stubner, F. (χ.χ.). *Maritime Duster*. Ανάκτηση Νοέμβριος 13, 2022, από <https://www.maritimes->

- cluster.de/fileadmin/user_upload/Veranstaltungen/Dokumente/Powered_by_Methanol_Fredrik_Stubner.pdf
- TECNOVERITAS. (2018). MRV CARBON TRADING & SHIP ENERGY EFFICIENCY.
- THE ROYAL SOCIETY. (2019). *Sustainability synthetic carbon based fuels for transport*.
- UNEP. (2012). *Report of the United Nations Environment Programme*.
- Verbruggen, J. J. (2018). *Powering a representative ROPAX ferry in 2050 with minimal greenhouse gas emissions*. TUDelft.
- Wikipedia. (2006). *Wikipedia*. Ανάκτηση Νοέμβριος 13, 2022, από https://en.wikipedia.org/wiki/Table_of_biodiesel_crop_yields
- Wikipedia. (2010). *Wikipedia*. Ανάκτηση Νοέμβριος 13, 2022, από https://en.wikipedia.org/wiki/File:PEM_fuel_cell.svg
- Wittrig, D. S. (2015). *Ammonia Fuel Opportunities, Markets, Issues*. Ανάκτηση Νοέμβριος 8, 2022, από https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/Wittrig_Ammonia_TransportationFuels_Workshop.pdf
- Xing, H., Stuart, C., Spence, S., & Chen, H. (2021, Ιανουάριος). Fuel Cell Power Systems for Maritime Applications: Progress and Perspectives. *Sustainability*. doi:<https://doi.org/10.3390/su13031213>
- Yip, H. L., Srna, A., Chun, A., & Chun Yin Yuen, A. (2019, Νοέμβριος). *A Review of Hydrogen Direct Injection for Internal Combustion Engines: Towards Carbon-Free Combustion*. Ανάκτηση Νοέμβριος 14, 2022, από Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/337199769_A_Review_of_Hydrogen_Direct_Injection_for_Internal_Combustion_Engines_Towards_Carbon-Free_Combustion
- Youngkyun , S., & Seongjong , H. (2021, Δεκέμβριος). Economic Evaluation of an Ammonia-Fueled Ammonia Carrier Depending on Methods of Ammonia Fuel Storage. *energies*. doi:<https://doi.org/10.3390/en14248326>

Youngkyun Seo, S. H. (χ.χ.). *Economic Evaluation of an Ammonia-Fueled Ammonia Carrier*. Energies 2021.

Zhou, Y., Pavlenko, N., Rutherford, D., Osipova, L., & Comer, B. (2020). *The potential of liquid biofuels in reducing ship emissions*.